



INSTITUTO DE INGENIEROS
CHILE

INGENIERÍA BIOMÉDICA

NUEVOS DESAFÍOS PARA LA INGENIERÍA NACIONAL



COMISIÓN DE INGENIERÍA Y CIENCIAS DE LA VIDA - 2020

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (UPADI)
Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

PRESIDENTE

Ricardo Nicolau del Roure G.

PRIMER VICEPRESIDENTE

Luis Nario Matus

SEGUNDO VICEPRESIDENTE

Carlos Mercado Herreros

TESORERA

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

PROTESORERO

Jorge Pedrals Guerrero

SECRETARIA

Ximena Vargas Mesa

PROSECRETARIO

Germán Millán Valdés

DIRECTORIO 2020

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Juan E. Cannobbio Salas

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Alex Chechilnitzky Zwicky

Raúl Demangel Castro

Andrés Fuentes Torres

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Rodrigo Gómez Álvarez

Cristian Hermansen Rebolledo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Valdés

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazin Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

Luis Valenzuela Palomo

René Vásquez Canales

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADEMICAS

MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACION CHILENA DE SISMOLOGIA
E INGENIERIA ANTISISMICA, **ACHISINA.**
Presidente: Rodolfo Saragoni H.

ASOCIACION INTERAMERICANA DE
INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
CAPITULO CHILENO, **AIDIS.**
Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA
HIDRAULICA, **SOCHID.**
Presidente: José Vargas B.

SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA,
SOCHIGE.
Presidente: Gonzalo Montalva A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA
DE TRANSPORTE, **SOCHITRAN.**
Presidenta: Carolina Palma A.

PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER
Presidente: Alfonso Barraza San M.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, **SOCHEDI.**
Presidente: Mario Letelier S.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Economía Circular.
Presidente: Javier García M.

Inteligencia Artificial y el Big Data.
Presidente: Juan Carlos Barros M.

Ingeniería y Ética.
Presidente: Elías Arze C.

Ingenieros en la Historia Presente.
Presidente: Ricardo Nanjarí R.

Ingeniería y Ciencias de la Vida.
Presidente: Alejandro Steiner T.

*La Gestión y Calidad del Diseño de los
Proyectos de Ingeniería.*
Presidente: Ricardo Nicolau del Roure

Prospectivas de la Ingeniería.
Presidente: Jorge Yutronic F.

Visión del Negocio del Cobre.
Presidente: Andrés Fuentes T.

CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Jorge Cauas Lama

Joaquín Cordua Sommer

Luis Court Moock

Alex Chechilnitzky Zwicky

Raúl Espinosa Wellmann

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Tristán Gálvez Escuti

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Agustín León Tapia

Jorge López Bain

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larrain

Luis Pinilla Bañados

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazin Arellano

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Solano Vega Vischi

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



INSTITUTO DE INGENIEROS
C H I L E

INGENIERÍA BIOMÉDICA

NUEVOS DESAFÍOS PARA LA INGENIERÍA NACIONAL

Presidente: Alejandro Steiner T.

Participantes: José Tomás Arenas C.
Juan Carlos Barros M.
Dra. Gloria Henríquez D.
Dr. Hernán Sandoval O.
Loreto Valenzuela R.
Alberto Vergara F.
Carlos Villagrán F.

Índice

1.	Introducción	3
2.	Salud y Tecnología en el Siglo XXI.	8
2.1	De la atención de la enfermedad a la construcción de la salud	8
2.2	La situación nacional.....	8
2.3	Políticas públicas en salud.	11
2.4	Actualización del modelo de atención	15
2.5	Actualizar el modelo de gestión del sistema de salud	17
3.	Gestión de Organizaciones y Tecnologías en Salud	18
3.1	Iniciativas para mejorar el funcionamiento del Sector Salud	18
4.	Un intento de clasificación de la Ingeniería Biomédica	22
4.1	Áreas de Estudio de la Ingeniería Biomédica	22
5.	Ingeniería Biomecánica	25
5.1	Biomecánica médica o clínica	26
5.2	Biomecánica ocupacional (Fisioterapéutica)	27
5.3	Métodos y aparatos utilizados en ingeniería biomecánica	28
5.4	Biomecánica Computacional	29
5.5	Mecanobiología computacional	30
5.6	Aplicaciones	31
6.	Instrumentación biomédica	32
6.1	Dispositivos diagnósticos	33
6.2	Dispositivos terapéuticos.....	34
6.3	Sensores biomédicos	36
6.4	Ingeniería de rehabilitación	38
7.	Inteligencia artificial	40
7.1	Definiciones	40
7.2	Aprendizaje	41
7.3	Aplicaciones en salud.....	41
7.4	Condiciones habilitantes.....	44
7.5	Oportunidades para el escenario chileno	45
8.	Formación de profesionales.....	48
8.1	Características generales	48
8.2	Situación en Chile	49
8.3	Campo ocupacional	52
9.	Síntesis, Conclusiones y recomendaciones	54
9.1	Síntesis.....	54
9.2	Conclusiones	57
9.3	Recomendaciones.....	59

Gráficos

Gráfico 1: Ámbitos de acción de la biomecánica	25
Gráfico 2: Relación entre ingeniería biomecánica y otras disciplinas de la ingeniería y la medicina.	26
Gráfico 3: Etapas de un sistema de bioinstrumentación.....	33
Gráfico 4: Diagrama de Venn Inteligencia Artificial.....	40
Gráfico 5: Tipos de algoritmos de Inteligencia Artificial.....	41
Gráfico 6: Inteligencia Artificial en Salud	42
Gráfico 7: 10 mayores enfermedades asistidas con Inteligencia Artificial	43

Tablas

Tabla 1: Ingeniería aplicada a las Ciencias de la Vida	5
Tabla 2: Ingeniería y Ciencias de la Vida	6
Tabla 3: Desafíos e iniciativas.....	19
Tabla 4: Ramas de la Ingeniería Biomédica	22
Tabla 5: Ejemplos de dispositivos de asistencia	39
Tabla 6: IMDRF Software as a Medical Device (SaMD)	44
Tabla 7: Áreas de investigación de universidad extranjeras	49

Resumen Ejecutivo

La ingeniería biomédica combina habilidades de diseño y de ingeniería con ciencias biológicas y médicas. Es una rama de la ingeniería con muchos años de existencia en el extranjero, pero poco conocida en nuestro país, a pesar de que varias instituciones académicas nacionales tienen una pujante actividad en este campo. La razón para este empuje es clara cuando se examina su próximo futuro.

Hoy en día los ingenieros biomédicos aplican su formación a diversas formas del tratamiento de la salud y al desarrollo de equipos de diagnóstico, materiales biocompatibles, nuevas tecnologías de imágenes médicas, dispositivos portátiles y rápidos de diagnóstico de enfermedades, prótesis, fitofármacos y al diseño de órganos. Pero también hoy están ocurriendo cambios importantes en el área de la salud que hará a los ingenieros biomédicos aún más necesarios.

En efecto, nuestro país ha visto disminuir de manera substancial las enfermedades transmisibles, lo que ha hecho más visible las enfermedades crónicas no transmisibles, cuya gravitación crece con el envejecimiento de la población.

Las consecuencias más aparentes serán el cambio del lugar de tratamiento, que pasará del hospital al hogar, y el cambio del tipo de cuidado, que pasará desde el diagnóstico y tratamiento a la prevención y gestión. El sistema de salud requerirá menos camas y más desarrollo de servicios que proporcionen mejor acceso y calidad del cuidado, a un menor costo. Sensores y dispositivos inteligentes para monitorear remotamente la salud del paciente, serán el objeto de importantes esfuerzos de la ingeniería biomédica para identificar signos tempranos de degradación y prevenir eventos adversos. Este cambio hará cada vez más importante la informática médica y la inteligencia artificial.

A las áreas ya habituales de la ingeniería biomédica, como la ingeniería clínica, la biomecánica, de rehabilitación, de tejidos biológicos y biomateriales de instrumentación, y la vasta gama de dispositivos para medir, evaluar y tratar sistemas biológicos, se agrega ahora el desarrollo de numerosos sensores biomédicos físicos, químicos, eléctricos y ópticos, de especial importancia para la medición y diagnóstico a distancia de variables fisiológicas.

Uno de los mayores impactos de los avances tecnológicos se dará en el terreno de la inteligencia artificial. Esta tecnología permitirá diagnósticos más certeros en apoyo al trabajo de médicos y otros profesionales de la salud, a nivel de la atención primaria de salud (APS). A esto se sumará la miniaturización de los equipos y la facilidad de manejo y exactitud de los exámenes de laboratorio, los que podrán ser usados en los consultorios periféricos con obtención inmediata de resultados para el autocontrol de algunas dolencias, que los propios pacientes podrán monitorear a través de sus variables biológicas para ajustar sus tratamientos.

En atención a lo anterior, este documento está concebido tanto para dar a conocer en aquellos círculos que se interesan en el tema, la opinión que sobre este campo tiene el Instituto, como para informar y formar opinión en el propio Instituto.

Por ello, el documento tiene una fracción importante de carácter descriptivo y didáctico, y sus conclusiones se refieren a las funciones que la ingeniería debe cumplir en este campo. Las recomendaciones están asociadas con las políticas públicas que el Instituto puede promover, así como fomentar las oportunidades para la ingeniería chilena que los cambios señalados traerán consigo.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy vivimos en un mundo que se encuentra en un proceso de cambio acelerado, en el que la tecnología está transformando la economía, las empresas, la sociedad y la vida de las personas. El progreso científico y tecnológico ocurrido en las últimas décadas ha generado un importante cambio en el quehacer de la Ingeniería⁽¹⁾, haciendo cada vez más difusa la frontera que tradicionalmente existió entre esta disciplina y las Ciencias de la Vida⁽²⁾. Esta situación ha incidido en la formación de profesionales, dando origen a programas que vinculan la ingeniería con las ciencias de la vida, sin clara definición de las áreas de estudio incluidas ni de sus contenidos. Lo mismo ocurre con diferentes subáreas de especialización, en las que la Ingeniería se relaciona de diferentes maneras con la biología, sin que haya consenso respecto a las áreas de estudio y contenidos incluidos en cada una de ellas.

Como una manera de formar opinión sobre este tema, el Instituto de Ingenieros de Chile (IICh) ha decidido preparar un documento sobre Ingeniería y Ciencias Biomédicas, o sea, sobre aquella parte de la Ciencias de la Vida asociadas con la salud humana y en las que la ingeniería tiene un rol creciente.

En general, el Instituto ofrece a los interesados una opinión informada sobre temas de interés para la sociedad. Expresa una opinión apoyada en conocimientos técnicos de los miembros del instituto y de sus invitados y tiene un auditorio que aprecia esos aportes. En esta ocasión la situación es un poco diferente, porque este documento está concebido tanto para ilustrar los círculos de interés en el tema de la opinión que sobre él manifiesta el Instituto, tanto como para informar y formar opinión en el propio Instituto.

La intención inicial del Instituto era tocar las relaciones entre la Ingeniería y las Ciencias de la Vida, que incluyen la biología de todos los seres vivos, pero una consideración más detallada del tema mostró que ese alcance era excesivo. Esta consideración ha llevado a centrarlo en los temas de la salud humana, es decir en la medicina y la manera como la sociedad resguarda la salud y la calidad de vida de sus miembros.

El tema es del mayor interés porque los cambios que han sobrevenido en el mundo en las sociedades económicamente avanzadas han alcanzado a nuestro país que, en este sentido, tiene problemas de naturaleza enteramente semejante al de ellos.

Veamos primero lo que ha ocurrido en el mundo en el campo de la salud. Según señala el Foro Económico Mundial⁽³⁾, *de cualquier modo, que se la mida, la salud global ha mejorado dramáticamente en las últimas décadas. Sin embargo, el modelo corriente de salud pública está siendo lentamente desgarrado por las fuerzas opuestas del envejecimiento de la población y de las mayores restricciones de gastos de los gobiernos.*

¹ Conjunto de conocimientos científicos y tecnológicos para la innovación, invención, desarrollo y mejora de técnicas y herramientas para satisfacer las necesidades y resolver los problemas de las personas y así a la sociedad.

² Comprenden todos los campos de la ciencia que estudian los seres vivos, como las plantas, animales y seres humanos. Tienen aplicaciones en la salud, la agricultura, la medicina y las industrias farmacéutica y de la ciencia de los alimentos.

³ Transformación Digital de las Industrias: la salud

Los grandes cambios que están ocurriendo tienen su origen en la desaparición de las Enfermedades Transmisibles, en el envejecimiento de la población y en el peso progresivo en el sistema de salud de las Enfermedades Crónicas no Transmisibles. A nivel mundial ha ocurrido un aumento en la esperanza de vida al nacer, de 64 años en 1990 a 71 años en 2013. En Chile la esperanza de vida de las mujeres alcanza los 82 años y la de los hombres los 78 años ⁽⁴⁾. La tasa de mortalidad infantil ha disminuido en casi 50% a nivel mundial y en Chile no alcanza al 0,7%. Sin perjuicio de todo lo anterior y aunque ha habido avances significativos en acceso a la atención sanitaria y un mejoramiento en la calidad de vida de las personas, también ha tenido lugar un aumento en el número de años de vida perdidos por enfermedades cardiovasculares y en general en las no transmisibles.

Al momento de la preparación de este informe, el mundo y nuestro país sufren los efectos del Coronavirus, pandemia viral en curso. La enfermedad, que a abril de 2020 ya ha alcanzado a más de cien mil y terminará con la vida de miles en el mundo y quizás también en nuestro país y cuyo fin aún no se vislumbra, sin duda tendrá efectos sociales y económicos de tremenda importancia. Por otra parte, solo a partir del año 2000, el mundo ha visto la aparición de enfermedades virales como el ébola, la gripe porcina, la gripe aviar y el SARS Covid- 02 que muestran que, si bien los antibióticos han visto disminuir y en algunos casos terminar con enfermedades transmisibles provocadas por bacterias, la medicina no dispone de una panoplia de armas de la misma variedad y eficacia para el combate de las enfermedades de origen viral. Sin embargo, grandes epidemias virales que asolaron el mundo en el pasado, han sido controladas y hasta erradicadas con vacunas; viruela, sarampión, polio, paperas, hepatitis, rabia, cáncer cervicouterino, entre otras. En las enfermedades virales la prevención es mucho más eficaz que cualquier tratamiento medicamentoso, a excepción del VIH para el cual no se dispone de vacuna, pero para el cual hay medicamentos eficaces.

Pero aun teniendo en cuenta esta prevención, sigue siendo cierto que la mayor preocupación de la población en tiempos normales, son las Enfermedades Crónicas no Transmisibles. Es sobre estas últimas que pondremos nuestra atención.

El cambio de las enfermedades transmisibles a las no transmisibles traerá dos grandes transformaciones, a saber, el cambio del lugar de tratamiento, que pasará del hospital al hogar, y el cambio del tipo de cuidado, que pasará desde *el diagnóstico y el tratamiento a la prevención y la gestión*. El paciente internado dará paso al paciente *externado* y la casa se convertirá en el lugar importante para los cuidados médicos. Si esto cumple, el sistema de salud requerirá menos camas y más desarrollo de servicios que proporcionen mejor acceso y calidad del cuidado, a un menor costo. Con ello el acento pasaría a la prevención y el acceso, usando medios digitales, reduciendo así la necesidad de trabajo especializado, aumentando la eficiencia y disminuyendo los costos.

Una amplia gama de servicios digitales inteligentes permitirá a los ciudadanos tomar un papel más activo en la gestión de su propio bienestar y atención médica, ayudando a prevenir enfermedades crónicas al incentivar a las personas a vivir de manera saludable y tomar decisiones correctas sobre su estilo de vida. A esto se agregarán sensores y dispositivos inteligentes para monitorear remotamente la salud de un paciente, identificando signos tempranos de su degradación previniendo así eventos adversos. Estos dispositivos, regulados por la autoridad sanitaria, promoverán la autoatención como la primera capa de intervención.

⁴ Esa es la esperanza de vida de la población actual, si bien una niña recién nacida, ceteris paribus ex ante Covid 19, porque éste genera una incertidumbre sobre las tendencias de la esperanza de vida, tendría una esperanza de vida de más de 90 años.

Estos cambios ya están presentes en nuestro país y las consecuencias que ello tiene en la organización del cuidado de la salud son el objeto del primer capítulo de este informe. El acento está puesto en la manera como la ingeniería intervendrá en este cambio.

Como hemos señalado, las Tecnologías de la Información serán relevantes en el cambio de la Gestión de Organizaciones y Tecnologías en Salud. Algunas de las acciones relevantes en este campo se describen en el tercer capítulo del informe. En él se muestra la variedad de acciones que son necesarias para enfrentar el cambio en que la ingeniería tiene un rol importante.

Una dificultad que se ha enfrentado en la preparación de este informe ha sido la dispersión en el uso de los términos. En la revisión bibliográfica realizada, se ha podido apreciar que términos que para algunos autores identifican una categoría, son para otros elementos contenidos en esa categoría, la que para estos otros autores tiene otro nombre.

Por ello, antes de entrar en los capítulos específicos de la Ingeniería Biomédica, hemos preparado nuestra propia versión de categorías aplicables a las Ciencias de la Vida con el propósito de evitar algunas ambigüedades que pueden conducir a confusiones del lector.

La ingeniería en las ciencias de la vida integra un conjunto de campos que estudian los seres vivos, como biología, medicina, bioquímica y biomedicina. Los principios de estos campos son utilizados de manera conjunta con las herramientas de la ingeniería para crear productos económicamente viables. Los principios de ingeniería se aplican a la resolución de problemas en un gran número de áreas que van desde el nivel molecular, pasando por sistemas celulares y basados en tejidos, hasta organismos macroscópicos, plantas, animales, e incluso ecosistemas.

Los ingenieros relacionados con las ciencias de la vida estudian los sistemas de la naturaleza para crear nuevos productos o modificar y controlar los sistemas biológicos, de modo que puedan reemplazar, aumentar, sostener o predecir procesos químicos, bioquímicos y mecánicos

En la siguiente tabla se presentan algunas ramas de la Ingeniería aplicada a las Ciencias de la Vida, dentro de las cuales está la Ingeniería Biomédica, aunque no existe uniformidad de criterio respecto a estas definiciones.

Tabla 1: Ingeniería aplicada a las Ciencias de la Vida

Área de estudio	Disciplinas científicas y tecnológicas involucradas	Objetivo
Ingeniería Bioquímica	Utiliza conceptos y principios de ingeniería química y de biología.	Aplicar los hallazgos científicos obtenidos por biólogos y químicos en sus laboratorios y traducirlos en un proceso de fabricación a gran escala.
Bioingeniería	Utiliza principios de ingeniería y conceptos de biología para generar soluciones Industriales, ambientalmente sostenibles.	Entregar soluciones a la ingeniería con herramientas de biología molecular que puedan tener aplicaciones industriales.
Ingeniería Biomédica	Utiliza principios de ingeniería y conceptos de diseño y los aplica a la resolución de problemas en medicina.	Combinar las habilidades de diseño y resolución de problemas de la ingeniería con las ciencias biológicas y médicas con el objeto de avanzar en el tratamiento de la salud.

Referencia: Elaboración propia

La ingeniería bioquímica es la ingeniería de bioprocesos en que la ingeniería química y la biología se ocupan del desarrollo, diseño y construcción de procesos unitarios que involucran organismos biológicos o moléculas orgánicas.

El papel del ingeniero bioquímico es aplicar los hallazgos desarrollados por biólogos y químicos en laboratorio a un proceso de fabricación a gran escala. Los ingenieros bioquímicos trabajan en una variedad de industrias, desde alimentos hasta salud. En el ámbito de los alimentos, los ingenieros bioquímicos se centran principalmente en el diseño de sistemas que mejorarán la producción, procesamiento, envasado, almacenamiento y distribución de alimentos. En el ámbito de la salud, trabajan diseñando productos farmacéuticos, órganos artificiales, dispositivos biomédicos, sensores químicos y sistemas de administración de medicamentos.

La bioingeniería se centra en soluciones de ingeniería, ambientalmente sustentables, que permitan satisfacer las necesidades de la sociedad en agricultura, ecosistemas y la ciencia de los alimentos. La bioingeniería ha influido considerablemente en el desarrollo de la biología molecular, a través de la bioinformática, disciplina que puede entenderse como la aplicación de tecnologías computacionales y la estadística a la gestión y análisis de datos biológicos.

La ingeniería biomédica o ingeniería médica aplica los principios de ingeniería y conceptos de diseño a la medicina y a la biología, con fines sanitarios. Este campo busca cerrar la brecha entre ingeniería y medicina, combinando las habilidades de diseño y resolución de problemas de ingeniería con ciencias biológicas y médicas para avanzar en el tratamiento de la salud, incluyendo el diagnóstico, monitoreo y terapia.

La ingeniería biomédica tiene amplio rango de aplicación, que incluye las áreas de ingeniería clínica, informática médica, ingeniería biomédica, instrumentación biomédica, ingeniería de rehabilitación e ingeniería de tejidos y biomateriales.

Esta disciplina tiene un amplio campo de aplicación, que incluye entre otros aspectos el diseño de dispositivos médicos, equipos de diagnóstico, materiales biocompatibles, nuevas tecnologías de imágenes médicas, dispositivos portátiles y rápidos de diagnóstico de enfermedades, prótesis, de biofarmacéuticos y de diseño de órganos.

Tabla 2: Ingeniería y Ciencias de la Vida

Ing. bioquímica	Bioingeniería	Ing. Biomédica
Productos farmacéuticos	Recursos hídricos y terrestres	Ingeniería clínica
Órganos artificiales	Alimentos	Informática médica
Dispositivos biomédicos	Sistemas de maquinaria	Ingeniería biomecánica
Sensores químicos	Recursos naturales	Instrumentación biomédica
Sistemas de administración de medicamentos	Ingeniería ambiental	Ingeniería de rehabilitación
	Biotecnología molecular	Ingeniería de tejidos y biomateriales

Referencia: Elaboración propia

En el capítulo III hemos mostrado algunas proposiciones y desarrollos recientes en informática médica. Los capítulos IV, V y VI están dedicados a aspectos importantes de la ingeniería biomédica como la ingeniería biomecánica, la instrumentación biomédica y la aplicación de la inteligencia artificial a la salud

Por último, se ha dedicado un capítulo a la formación que ofrecen las universidades chilenas a la ingeniería biomédica y las líneas de investigación que están siguiendo. Es notorio que ellas no entienden el campo de la misma manera, de modo que los alumnos que escogen una universidad escogen al mismo tiempo un campo específico de la aplicación de la Ingeniería biomédica.

2. SALUD Y TECNOLOGÍA EN EL SIGLO XXI.

2.1 De la atención de la enfermedad a la construcción de la salud

Estamos en una época de grandes cambios en la forma de enfrentar la salud de la población, el mayor será "transitar desde una visión de la atención de la enfermedad a la construcción de la salud". Esta es una gran transformación, porque hasta ahora el quehacer principal de los sistemas de salud, que son en realidad sistemas de atención médica, es atender la enfermedad, a excepción de la vacunación sistemática de la población en las enfermedades transmisibles, o la cobertura masiva en aquellas enfermedades prevenibles, en especial nutricionales o por carencias específicas (vitaminas, minerales), para las cuales se dispone de medios terapéuticos eficaces. Mención aparte son las políticas públicas con impacto masivo, como las mejoras en higiene pública, (acceso al agua potable, tratamiento de las excretas, higiene de alimentos, mejoramiento de la calidad del aire urbano, entre otras), que con importantes efectos sanitarios, son ejecutadas por otros sectores de la administración.

Los progresos científicos y tecnológicos con impacto en la salud son numerosos y hay una rápida transferencia de los descubrimientos del campo científico a la práctica de la medicina. El mayor desafío es la capacidad de incorporar estos avances a la práctica habitual de los servicios de salud, tanto más cuanto muchos de ellos son de gran impacto y eficacia terapéutica y permiten aumentar la cobertura efectiva ⁽⁵⁾, y rebajar costos en la atención de los pacientes.

La población ha alcanzado mayor nivel de instrucción, 11 años de escolaridad en Chile y es más exigente en cuanto a la calidad de la atención y también de los resultados esperados. Esta es una oportunidad para el sistema de salud de hacer partícipes a los usuarios en la toma de decisiones, no sólo en cuanto pacientes en relación con las dolencias que los aquejan, sino en cuanto ciudadanos usuarios para que participen en las prioridades y organización del sistema. En la práctica hay que avanzar en la construcción de la salud, considerando que el verdadero constructor es el individuo y su comunidad y que el sistema de salud con sus profesionales son co-constructores de la salud de las personas y de la comunidad, que aportan un conocimiento específico y una tecnología que va en la misma dirección. Para ello, es preciso superar la relación autoritaria y prescriptiva del personal de salud en todos sus niveles.

2.2 La situación nacional

Chile tiene un sistema de salud que le ha permitido alcanzar indicadores de salud muy positivos. Nos situamos entre los primeros países, en el continente americano, en cuanto a esperanza de vida, baja mortalidad infantil y baja mortalidad materna. A esto se agrega también que el país completó lo que se llama la transición epidemiológica, es decir pasamos desde un perfil en el cual dominaban las enfermedades transmisibles (virus, microorganismos y parásitos) y las asociadas a la madre y

⁵ COBERTURA EFECTIVA: Representa el nivel de ganancias en salud que un individuo o una población obtiene cuando recibe una acción en salud que necesita, es decir, esta medida busca evaluar el resultado de una o múltiples acciones preventivas y curativas que realiza el sistema de salud para mejorar la salud de la población (OMS 2003). Ej.: Cobertura efectiva de Hipertensión Arterial o Diabetes Mellitus. <https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2016/09/GLOSARIO-APS.pdf>

niño (mortalidad materna, mortalidad infantil y desnutrición), que dominan el perfil epidemiológico de los países en desarrollo, a uno donde dominan las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT) (diabetes, hipertensión arterial, depresión, enfermedades músculo esqueléticas, cánceres, entre otras) con prácticamente la erradicación de muchas de las enfermedades transmisibles, que son aún un flagelo en países menos desarrollados. Esta transición epidemiológica nos obliga a enfrentar con otras visiones la patología dominante en la sociedad, es decir considerando que las ECNT, en su larga evolución, producen un deterioro que lleva a una discapacidad o a la muerte prematura. Son enfermedades que por su larga evolución permiten tomar medidas para evitar el deterioro. Esto implica básicamente un acompañamiento permanente de las personas que sufren de esas condiciones, precisamente con el objeto de que internalicen las conductas y adopten los tratamientos que van a llevar a que no se produzcan complicaciones. Los gráficos que muestran los estudios del Instituto de "Health Metrics and Evaluation", de Seattle (IHME), son bastante explicativos en cuanto a cuáles son las enfermedades que dominan el perfil epidemiológico del país⁶.

La gran paradoja del sistema de salud chileno es que con buenos resultados sanitarios existe una gran insatisfacción de la población respecto del sistema de salud.

A nuestro juicio, ello tiene múltiples razones, siendo no menor la inadaptación del sistema de salud al nuevo perfil epidemiológico de la población. Un sistema concebido en torno a las enfermedades transmisibles y los problemas de salud madre y niño, debe ahora hacerse cargo de las enfermedades crónicas no transmisibles. Por ejemplo el perfil del demandante de servicios es hoy un adulto trabajador que no tiene acceso a consultorios de atención primaria que cierran a las 18:00 hrs., y cuando sufre alguna dolencia, que puede ser una expresión de una enfermedad crónica no transmisible, debe concurrir a los servicios de urgencia, en circunstancias que su dolencia no es en sí una urgencia, recargando estos últimos, que no pueden atender debidamente este tipo de pacientes y deteriorando la capacidad de atención de las urgencias reales. El paciente, en estos casos percibe que ha sido mal atendido, lo que es real, y se frustra.

¿Cómo mejorar la atención manteniendo los buenos resultados sanitarios?

La pregunta pertinente en este caso es ¿cómo aporta la tecnología a la mejor atención de salud y a la percepción que de ella tiene la población?

El desarrollo en este sentido comprende los aspectos que siguen.

Promoción de la salud y prevención de las enfermedades.

El mejor conocimiento de los mecanismos de génesis de la enfermedad (genética, biología molecular) permite una intervención sanitaria óptima en oportunidad y eficacia. La transferencia de ese conocimiento debe ser activa e intencionada para generar conciencia y conductas que permitan implementar esas medidas en la población misma y en el momento más oportuno. Esto es muy importante para darle su lugar a medidas educativas o de soporte para los cambios conductuales que permiten mantener la salud, en especial en relación con conductas nocivas, (tabaquismo, sobrepeso, sedentarismo, alcohol y drogas, exposición ambiental). Este aspecto se beneficia de los progresos en las técnicas educativas y de los medios de comunicación de masas.

La genética y la biología molecular posibilitan un mejor conocimiento de los factores de riesgo y la identificación de los factores genéticos que pueden condicionar, ya sea directamente una

⁶ <http://www.healthdata.org/chile?language=149>).

enfermedad o bien una susceptibilidad frente a agentes ambientales, que implican el desencadenamiento de una patología. Los indicadores bioquímicos precoces de deterioro permitirán establecer grupos de riesgo que sean objeto de programas preventivos ad-hoc. La identificación de los factores de riesgo ambientales y sus mecanismos de acción permitirá su mejor control y con ello disminuir la carga de enfermedad de la sociedad. Además, en aquellos casos en que los indicadores de daño ya están presentes se podrá realizar su monitoreo permanente, con el objeto de impedir que esto produzca una alteración significativa de las funciones orgánicas y su expresión, que son las enfermedades o las discapacidades; en consecuencia, la construcción de la salud es el objetivo principal de los sistemas de salud en el siglo XXI.

La biotecnología permitirá acceder a nuevas y poderosas vacunas, para enfermedades hasta hoy día no inmunizables, lo que posibilitará avances en la erradicación o control de enfermedades transmisibles y bajar los costos de las vacunas para flagelos tradicionales, facilitando coberturas poblacionales más extensas. También aparecen nuevos tratamientos en base a medicamentos biológicos. Actualmente, la incorporación de las técnicas de biología molecular e ingeniería genética y proteica han permitido ampliar el horizonte de la generación de anticuerpos monoclonales y sus usos, y se han encontrado técnicas con el fin de facilitar los trasplantes.

La promoción de la salud y la prevención de las enfermedades pueden ser más específicas y eficaces y tendrán un gran impacto en la esperanza de vida y la calidad de vida de las personas.

Diagnóstico

Uno de los mayores impactos de los avances tecnológicos se dará en el terreno de la inteligencia artificial, que permitirá diagnósticos más certeros, como apoyo al trabajo de los médicos y otros profesionales de la salud, a nivel de la atención primaria de salud (APS). A ello se unirá la miniaturización de los equipos, facilidad de manejo y exactitud de los exámenes de laboratorio, que podrán ser usados en los consultorios periféricos con obtención inmediata de los resultados. La miniaturización permitirá también el autocontrol de algunas dolencias ya que los propios pacientes tendrán la posibilidad de monitorear los resultados de sus variables biológicas y ajustar los tratamientos.

La telemedicina permitirá practicar algunos exámenes en los consultorios periféricos y recibir el informe de los especialistas situados en los servicios hospitalarios, en tiempo real. Los exámenes endoscópicos, de gran sensibilidad y exactitud, podrán también ser usados en servicios ambulatorios. El diagnóstico genético será más fácil y exacto y permitirá hacer tratamientos selectivos y más ajustados a cada persona.

Los avances tecnológicos remitirán diagnósticos más exactos y sencillos de realizar, sin depender de grandes y complejas instalaciones.

Tratamiento

Los avances terapéuticos permitirán el manejo de numerosas enfermedades, con un gran impacto en la calidad de vida de muchas personas, tanto en la esfera de nuevos medicamentos, más poderosos y específicos, como de la cirugía mínimamente invasiva, los trasplantes de órganos y los implantes de órganos artificiales. Estas técnicas ya son practicadas, pero en el futuro serán de uso corriente y demandadas por los usuarios de los servicios de salud. Entre los avances ya en práctica está la cirugía robótica, que es más bien una cirugía practicada por avezados cirujanos con apoyo de

robots, que les permite mayor precisión y mínimo daño a los tejidos sanos. Sin embargo, su adopción no es fácil, por el alto costo de los equipos y la necesidad de un entrenamiento riguroso de los cirujanos que la usan. Hasta hoy es aún más caro operar con robótica que con los métodos más tradicionales.

Se podrán hacer tratamientos con menor costo, mejorando su eficacia y con mayor éxito terapéutico para enfermedades tradicionales y al mismo tiempo tratar patologías hoy inalcanzables y mejorar la calidad de vida de muchas personas con técnicas que requerirán más capacitación e infraestructura compleja.

Rehabilitación

Los implantes y reemplazos de órganos artificiales, prótesis más livianas y de mayor duración, equipos de ayuda sensorial (para ciegos y sordos) y un mejor soporte psicológico permitirán rehabilitar un mayor número de personas para reintegrarlas a una vida laboral y social activa. Los cyborgs⁷, ya existentes, son personas que cuentan con dispositivos electrónicos que les permiten sobrevivir o mejorar discapacidades. Los cyborgs más frecuentes son los que llevan marcapasos cardíacos o implantes cocleares que les permiten oír y su número aumentará, por la disponibilidad de nuevos aparatos electrónicos que complementarán funciones esenciales del organismo humano.

La tecnología permitirá rehabilitar eficazmente a más personas y por dolencias más severas, mejorando su calidad de vida.

Conclusión

Los aportes recientes de la ciencia y tecnología a la salud son importantes, masivos y de gran eficacia. Su magnitud es tal que es necesario configurar nuevos servicios de salud para incorporar con eficiencia esos avances a su quehacer, lo que permitirá rebajar costos en el manejo de muchas enfermedades.

2.3 Políticas públicas en salud.

Desde la reforma del sistema de salud realizada por el gobierno del presidente Lagos en 2004, el sistema de salud ha funcionado sin modificaciones significativas, a pesar de que Salud ocupa uno de los tres primeros lugares de la preocupación ciudadana y que se han sucedido numerosas comisiones que han propuesto cambios importantes en su funcionamiento, tanto en el financiamiento como en su gestión. Uno de los puntos de acuerdo de dichas comisiones, es que hay que avanzar en darle más importancia y mayor capacidad resolutoria, a la Atención Primaria de Salud (APS) municipalizada. Sin embargo, desde 2006, cuando el aporte a la APS fue del 28% del presupuesto público de Salud, el sistema ha funcionado por inercia y la fracción del presupuesto destinado a la APS bajó a 24% el 2019. Sin cambios significativos y con un deterioro de la capacidad de la APS municipal, que debe atender al 80% de la población, el impacto de la APS en la prevención primaria y secundaria de las ECNT es reducido. Para comparar, en países con una APS fuerte, ésta alcanza entre un 40 y un 50% del gasto público en salud (España, Canadá) y obtiene óptimos resultados.

Las políticas públicas prioritarias serían:

⁷ <https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%ADborg>

Controlar los factores de riesgo⁸ prevalentes en la población

La primera política pública es llevar a cabo acciones para promocionar la salud y prevenir la enfermedad. La atención médica es la última etapa en el desarrollo de las enfermedades, cuando éstas ya son percibidas por las personas. A partir de la noción de que la salud es un complejo multifactorial, en el cual la vida en sociedad determina en gran medida la carga de enfermedad de la población, tenemos que incluir en las acciones sobre la salud, públicas y privadas, el conocimiento que actuar sobre los factores de riesgo es tanto o incluso más importante que enfrentar las enfermedades cuando estas están ya declaradas. Aunque los factores de riesgo no son, en sí, causalidad, son identificables y susceptibles de ser modificados, de modo que no representen un elemento más en el origen de las enfermedades. La mayor parte de ellos pueden ser modificados por políticas públicas que disminuyan o eliminen su impacto negativo en la salud de la población. Según los estudios del IHME, ya mencionado, los factores de riesgo más importantes en la población chilena, en una época cuando el perfil epidemiológico está dominado por las enfermedades crónicas no transmisibles, son los siguientes:

Índice de masa corporal elevado (IMC).

Este es un indicador que relaciona la estatura con el peso y mide la superficie corporal. En Chile tenemos que cerca del 75% de la población presenta sobrepeso y obesidad; esta última ha aumentado en el periodo 2009-2010 a 2016-2017 en un 9%, pasando a constituirse en el mayor factor de riesgo para la salud de la población. La obesidad se asocia con numerosas enfermedades, desde diabetes, hipertensión arterial, depresión, enfermedades músculo-esqueléticas, hasta cánceres de distinto tipo e infarto, las mayores causas de muerte en Chile. Además, existe un gradiente social muy importante, por ejemplo, en relación con los años de estudio cursados, que se asocia con el nivel socio económico. En las personas con menos de 8 años de estudios, la tasa de obesidad es del 43,2%, mientras en la población con más de 12 años de estudio es de 27%. Hasta hoy no hay experiencias exitosas en disminuir el peso promedio de la población; al contrario, la obesidad es creciente en la mayoría de los países, por lo que está claro que las políticas que sólo buscan cambiar los estilos de vida han sido un gran fracaso.

Promover el incremento de la actividad física y deportes, generar las condiciones para su práctica (áreas verdes, campos deportivos, disminución de la jornada de trabajo a 40 horas semanales) son algunas de las medidas que las autoridades pueden poner en práctica para enfrentar el incremento de peso de la población.

Riesgo alimentario

Este se asocia fuertemente con el primero, es decir, no se están cumpliendo las indicaciones de una dieta saludable, que recomienda, por lo menos, el consumo de 5 porciones de frutas y verduras frescas al día y un límite de 2500 calorías diarias, en un adulto sano. La realidad muestra un consumo excesivo de alimentos de alta densidad calórica, por sus elevados contenidos de azúcares y de grasas. En este aspecto se ha insistido en políticas sin ningún efecto; por ejemplo “elige vivir sano” que promueve la adopción de hábitos saludables en alimentación y que es la continuación del programa “vida sana” de los gobiernos anteriores. En la práctica el peso promedio de la población

⁸ Factor de riesgo: Un factor de riesgo es cualquier rasgo, característica o exposición de un individuo que aumente su probabilidad de sufrir una enfermedad o lesión. OMS http://www9.who.int/topics/risk_factors/es/

sigue aumentando y la proporción de la obesidad también. Se ha seguido la línea de los Estados Unidos (el 2020, 64,2% de sobrepeso y obesidad, un 5,5% de aumento respecto a 2010), que ha mantenido en los últimos treinta años una política dirigida a obtener cambios conductuales, sin ningún efecto, ya que desde 1990 al 2015 el peso promedio de su población aumentó 6 kilos, con incremento de la proporción de obesos. Estas políticas voluntaristas, enfocadas en los llamados “estilos de vida”, no reconoce que éstos no son voluntarios, sino que están fuertemente determinados por las condiciones de vida que ofrece la sociedad y que son necesarias políticas públicas que generen las condiciones para conseguir los cambios conductuales.

En Chile los riesgos alimentarios han sido enfrentados a partir de la promulgación de la Ley de Etiquetado de Alimentos (2015), que indica, mediante señales de fácil comprensión, los contenidos de calorías, azúcar, grasas y sodio, y que informa si un alimento es saludable. Esta norma obliga a la industria de alimentos a modificar la composición de los productos que fabrica, buscando que los mismos no excedan los indicadores planteados por la ley. A pesar de su corto periodo de aplicación, sólo 5 años, es posible señalar que se están obteniendo resultados, en especial en el consumo de bebidas azucaradas, que ha disminuido en un 25% y la población tiende a remplazarla por bebidas que no tienen azúcar agregada.

Disminuir la densidad calórica de los alimentos industrializados y aumentar el consumo de frutas y vegetales frescos, son medidas probadas que necesitan de políticas públicas para ser aplicadas.

Aumento de la concentración de azúcar en la sangre en ayunas

Es un indicador precoz de la diabetes, que cuando supera los 125 mg/dl, es un nivel de riesgo, lo que sucede en un 12,3% de la población. Ello representa que hay un universo de más de 2.250.000 portadores de diabetes en distintas etapas de evolución, con el enorme impacto de una enfermedad silenciosa que causa muchas discapacidades y muerte prematura. Por ejemplo: dos tercios de los casos nuevos de insuficiencia renal terminal, que necesita diálisis, son producidos por riñón diabético. El programa de diálisis es un programa que cubre anualmente unas 25.000 personas en el sector público, con un costo superior a los \$215.000.000.000. Un diabético compensado no llega a la insuficiencia renal terminal.

La pesquisa activa para identificar los casos de diabetes, en cualquiera de sus etapas y ponerlos en programas de control de la enfermedad y prevención de las complicaciones discapacitantes, debe ser una política pública prioritaria.

Aumento de la presión arterial

En nuestra población, en los mayores de 18 años, el 28,7% de las personas tienen la presión arterial elevada, y ésta es una enfermedad silenciosa que a la larga produce daños muy importantes a nivel cardiovascular, renal y cerebral, por lo tanto, es un factor de riesgo significativo. Esta condición está fuertemente asociada a los riesgos anteriores y también al sedentarismo que afecta al 87% de la población. La pesquisa precoz y el tratamiento oportuno y persistente permiten prevenir las complicaciones.

La pesquisa activa de la hipertensión arterial para identificar precozmente los casos, y ponerlos en programas de control de la enfermedad y prevención de las complicaciones discapacitantes, debe ser una política pública prioritaria.

Consumo del tabaco.

A pesar de que en las sucesivas encuestas nacionales de salud de los años 2010, 2013 y 2017 se ha apreciado una disminución del hábito de fumar en la población general, más marcada en las mujeres que en los hombres, sigue habiendo un consumo elevado. Prácticamente el 33% de la población está constituido por fumadores habituales, lo que tiene impacto en la generación de enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares, insuficiencia respiratoria asociada a enfisema y enfermedad bronquial obstructiva crónica. Por último, el tabaco es la principal causa de cáncer pulmonar que en nuestra población sigue siendo una importante causa de muerte.

Las políticas públicas eficaces en este aspecto, que han resultado en Chile y otros países, se relacionan con el aumento del precio de tabaco, en general vía impuestos, restricción en los lugares que está permitido fumar y campañas educativas de la población, las cuales, en gran medida, se están aplicando, con algún grado de efecto en la disminución del consumo de tabaco.

Consumo de alcohol

Chile tiene una alta proporción de la población, alrededor de 2.000.000 de personas, que tendría un consumo riesgoso que se traduce en una de las más altas mortalidades del mundo por cirrosis hepática alcohólica, fuera de los trastornos conductuales, acompañados de conductas delictivas, como violencia intrafamiliar y trasgresiones que incluyen accidentes del tránsito y del trabajo.

La cirrosis hepática es una de las escasas enfermedades en que la mortalidad en Chile es un 56% más elevada que el promedio de los países con un desarrollo comparable.

Las políticas públicas eficaces, siguiendo la experiencia internacional, han sido; restricción al acceso al alcohol, con horarios acotados por ejemplo sólo hasta las 19 hrs., y fiscalización estricta en la venta a menores, que a pesar de estar prohibida, se practica.; aumento de precio mediante impuestos, que en nuestro país se aplican parcialmente, por las presiones de los poderosos productores de alcohol, penas corporales para los infractores a la ley bajo el efecto del alcohol, en especial al conducir vehículos motorizados. Estas podrían ser políticas prioritarias en Chile.

Otros riesgos de menor magnitud

Riesgos ocupacionales

Las tasas de accidentes del trabajo en Chile han mostrado una tendencia a la baja en los últimos 20 años, pero las tasas de enfermedades profesionales tenderían a elevarse. El aumento de los trabajadores por cuenta propia, sin cobertura de prevención de los riesgos ocupacionales y no declarados cuando ocurren, constituye un universo poco explorado y no bien esclarecido.

Contaminación del aire

La contaminación del aire en nuestras ciudades sigue siendo muy importante. Por una parte, la contaminación por micropartículas asociadas al uso de los motores diésel del transporte público y por otra una contaminación asociada al alto consumo de leña en malas condiciones de combustión, que provoca una importante contaminación en muchas ciudades del país, sobre todo en las regiones centro sur y sur.

Aumento de la concentración del colesterol de baja densidad en la sangre

Este aumento se asocia con el depósito de colesterol condición que se relaciona con enfermedad cardiovascular, infarto de miocardio, y cerebrovascular, que en conjunto representan la primera causa de muerte en Chile.

Insuficiencia renal crónica

Esta insuficiencia es un riesgo muy importante, aunque prevenible en gran medida, porque prácticamente dos tercios de los casos con daño renal, que necesita diálisis, son producidos por la diabetes.

2.4 Actualización del modelo de atención

El modelo de atención vigente corresponde a un perfil epidemiológico superado, es decir al de las enfermedades transmisibles y las de la salud materno infantil, dominante en el siglo XX, cuando la naturaleza de las patologías se resolvía con tratamientos breves (condiciones tan graves como una neumonía se superaban con algunas inyecciones del antibiótico apropiado) prescritos en la consulta de los médicos, o bien respondían a los aportes alimentarios, cuando había déficit nutricional. Es preciso crear un proceso de atención continua, que permita la interacción entre la Atención Primaria de Salud (APS) y la atención de mayor complejidad, especialidades ambulatorias y hospitalarias. El modelo de atención vigente guarda los componentes esenciales del concebido para satisfacer la demanda del perfil epidemiológico ya superado, enfermedades transmisibles y salud materno infantil y no el dominante actualmente. Para superarlo hay diversos elementos:

Fortalecimiento de la atención primaria de salud (APS)

Este fortalecimiento no debe ser concebido solo como un primer nivel de atención, sino que como un nivel global de gestión de las patologías de las personas y de control de los factores de riesgo y prevención de las enfermedades. La OMS define la APS como: *“La asistencia sanitaria esencial basada en métodos y tecnologías prácticos, científicamente fundados y socialmente aceptables, puesta al alcance de todos los individuos y familias de la comunidad mediante su plena participación y a un costo que la comunidad y el país puedan soportar, en todas y cada una de las etapas de su desarrollo con un espíritu de autorresponsabilidad y autodeterminación. La atención primaria forma parte integrante tanto del sistema nacional de salud, del que constituye la función central y el núcleo principal, como del desarrollo social y económico global de la comunidad”*. Hay que ser enfáticos en señalar que no se trata de un primer nivel básico de atención, ni menos de una atención simplificada para los pobres; es una atención integral institucional que emplea todas las técnicas accesibles para dar satisfacción a las necesidades de la población. Es lo que precisamente se necesita para atender el perfil epidemiológico dominante, es decir las enfermedades crónicas no transmisibles, que evolucionan en largos periodos de tiempo y en las cuales, para evitar las descompensaciones y discapacidades, es preciso un acompañamiento sistemático y permanente. La APS se funda en un criterio territorial para facilitar el acceso de las personas a los cuidados de salud, por lo que la proximidad es un criterio esencial para asegurar la continuidad de los cuidados.

Este fortalecimiento de la APS genera la necesidad de transferirle recursos financieros, recursos humanos y capacidad técnica desde los niveles de especialidad. Esto es de difícil implementación porque la hegemonía del pensamiento médico va hacia la especialidad; en la práctica las instituciones de salud están dominadas por los especialistas. Los avances mencionados en la

miniaturización y la facilidad de aplicación de diversos tipos de exámenes de diagnóstico a nivel de consultorios permitirán fortalecer la capacidad resolutoria de la APS y así evitar tener que referir los pacientes a otros niveles, y aumentar las listas de espera, que deterioran una atención adecuada. El fortalecimiento de la APS es una medida indispensable. Los países con sistema de salud avanzados, con gran eficacia, tienen un gasto asignado a la atención primaria de salud de aproximadamente el 50% de presupuesto, en cambio en nuestro país no alcanza al 26%.

Integración de las redes asistenciales

Este fortalecimiento de la APS requiere también establecer un continuo de atención de las redes asistenciales, es decir, que haya una comunicación permanente y privilegiada con el sistema de atención de especialidades y con las hospitalizaciones. Dentro de este continuo de atención, una de las cosas precisamente que la tecnología permite facilitar, es establecer una ficha única que pueda ser consultada a cualquier nivel. Hoy día toda la trasmisión de antecedentes, síntomas y razones para demandar la interconsulta de un especialista se hace por papel; en cambio, si hubiera una ficha integrada, que pudiera ser consultada en línea en cualquier nivel, se podrían comunicar las orientaciones que el especialista entrega a la APS para optimizar el manejo de la situación de un paciente.

Fortalecer la atención domiciliaria

Este fortalecimiento tiene como propósito descargar los hospitales de pacientes que no requieren cuidados especiales. En especial para procedimientos diagnósticos, que, aunque son invasivos permiten hacer el reposo posterior o el seguimiento en el domicilio, siempre que se cuente con las facilidades necesarias para realizarlo. Esto también se puede hacer respecto de la cirugía mínimamente invasiva en que el paciente es inmediatamente despachado a su domicilio después del periodo de recuperación y no necesita permanecer internado. Esto requiere transferir capacidad técnica y recursos a la APS y dotarla de las facilidades que le permitan acceder a los domicilios de los pacientes con presencia especializada, ya sea a nivel de enfermería o de consulta médica. Esto permitiría no solo el manejo de esas situaciones mencionadas, sino que además otro tipo de pacientes que necesitan de tratamiento constante, pero que pueden hacerse en domicilio y no en hospital, por ejemplo, enfermos postrados por enfermedades crónicas, ya sean físicas o mentales, pacientes terminales que necesitan tratamiento de cuidados paliativos, fundamentalmente, manejo del dolor. Todo esto se puede hacer hoy día e incrementar la atención domiciliaria es una medida indispensable para facilitar el continuo de prestación de servicios a los pacientes.

Superar la crisis hospitalaria

La mayor queja de la población se dirige a la mala atención en los hospitales, a las largas listas de espera tanto para cirugía de distinto tipo como para consultas o procedimientos de especialistas. En la práctica hay que redefinir el rol de los hospitales; **“como instalaciones especializadas que concentran recursos técnicos, instalaciones y personal entrenado para la realización de procedimientos complejos”**. Ello implica formar una red de apoyo para descargar a los pacientes tratados a su domicilio o a establecimientos de menor complejidad donde puedan, bajo vigilancia, completar periodos de recuperación, aparte de la necesaria transformación del modelo de gestión y financiamiento de los hospitales que arrastran una enorme deuda.

2.5 Actualizar el modelo de gestión del sistema de salud

Un tercer aspecto es la orientación del modelo de gestión desde uno que controla procesos, a otro que mida los resultados de salud de las personas.

El sistema de población a cargo, con un per cápita asignado, que es la forma de financiamiento de la APS, posibilita formar grandes bases de datos que permiten el seguimiento óptimo de los grupos de riesgo, en especial de los portadores de enfermedades crónicas. El éxito en mantener al paciente de enfermedades crónicas no transmisibles sin complicaciones consiste en el seguimiento cercano y persistente para reforzarlos en la mantención de un tratamiento que debe ser permanente y de largo plazo.

Las patologías crónicas deben ser manejadas a nivel primario para asegurar adecuada cobertura. Para ello se requieren protocolos de transferencia de conocimientos del nivel especializado con el objeto de definir las acciones a realizar en la APS para seguimiento permanente. En el sistema público, que da cobertura al 75% de la población, sería totalmente impracticable atender a los 2.300.000 diabéticos potenciales con especialistas diabetólogos, sino que éstos sólo serían necesarios para atender los casos refractarios al tratamiento habitual y de difícil manejo. Por otra parte, en el modelo de gestión vigente se mide el número de personas cubiertas por los respectivos programas y las prestaciones que ellos reciben, pero no se genera información de cuántas están efectivamente compensadas y sin riesgos de desarrollar complicaciones, que son la antesala de las discapacidades y de la muerte prematura. No basta con indicar cuantas personas están en control, es preciso medir la eficacia de dichos controles (cobertura efectiva); en diabetes por ejemplo solo el 35% de los pacientes en programa estarían efectivamente compensados y sin riesgo de desarrollar complicaciones incapacitantes⁹.

Por lo tanto, el cambio de modelo de gestión y de medición de la eficacia de la atención primaria y de los niveles de especialidad y hospitalario, es indispensable para una gestión en función de los resultados epidemiológicamente medibles.

⁹ https://diprece.minsal.cl/wrdprss_minsal/wp-content/uploads/2018/01/DIABETES-MELLITUS-TIPO-2-1.pdf

3. GESTIÓN DE ORGANIZACIONES Y TECNOLOGÍAS EN SALUD

En este capítulo nos preocuparemos por los esfuerzos que se hacen en nuestro país para digitalizar la salud y acelerar la introducción de los cambios señalados en el capítulo anterior, a saber, acercar el cuidado médico desde el hospital al hogar y cambiar la figura del Diagnóstico y Tratamiento a Prevención y Gestión.

3.1 Iniciativas para mejorar el funcionamiento del Sector Salud

Uno de los ejes de la conexión entre Ingeniería y Ciencias de la Vida tiene relación con la atención de salud. Esta sección resume el resultado de un trabajo de colaboración multigremial impulsada por la Fundación País Digital, la Asociación Chilena de Empresas de Tecnologías de Información A.G. (ACTI), la Asociación de Empresas Chilenas de Tecnologías A.G. (Chiletec), la Asociación Chilena de Informática en Salud (ACHISA), la Asociación de Isapres de Chile A.G. y el Centro Nacional en Sistemas de Información en Salud (CENS).

Estas instituciones formaron una mesa directiva para generar una propuesta de iniciativas para mejorar el funcionamiento del sector salud. En junio de 2018 el resultado del trabajo fue entregado al Ministerio de Salud.

El documento recopila las 15 iniciativas levantadas en 5 ejes de trabajo, en los que participaron más de 80 gerentes y jefes de área de 60 organizaciones de la academia, aseguradores, desarrolladores, gobierno y prestadores. El desarrollo de la actividad da cuenta de señales claras de compromiso para el desarrollo de tecnologías de información para la gestión de salud en Chile.

El contenido de la propuesta se articula en torno a cinco ejes definidos, a saber:

- Intercambio de información para facilitar el cuidado continuo del paciente;
- Gobernanza de TIC en Salud;
- Condiciones habilitantes para el desarrollo de nuevas tecnologías para la transformación de la atención en salud;
- Definición de información clínica y logística para la investigación y gestión;
- Desarrollo y reconocimiento de Capital Humano para TICs de Salud.

La tabla siguiente es un resumen que permite comprender el alcance de la propuesta señalada. El contenido de las iniciativas de la tercera columna se detalla más adelante.

Tabla 3: Desafíos e iniciativas

Desafío/Eje	Descripción	Iniciativas
Intercambio de información para facilitar el cuidado continuo del paciente	Definir los requerimientos de información básicos necesarios para facilitar el cuidado continuo del paciente a través de toda la red de salud en Chile, e identificar mecanismos para permitir la disponibilidad e interoperabilidad de ésta, de forma tal que esta información siga al paciente en donde se atienda.	1.1 Guías de Implantación 1.2 Definición de Estándares Semánticos y Sintácticos 1.3 Maestro de Prestadores 1.4 Maestro de Pacientes
Gobernanza de TICs en Salud	Generar gobernanza que concilie distintas perspectivas de estrategias en Salud a fin de definir los elementos esenciales para facilitar el desarrollo y uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación en Salud (TIC).	2.1 Creación de la Agencia de Gestión Digital en Salud 2.2 Estandarización de Compra o Contratación de Bienes y Servicios TIC en Salud
Condiciones habilitantes para el desarrollo de nuevas tecnologías para la transformación de la atención en salud	Identificar tecnologías emergentes y habilitantes (Telemedicina, Inteligencia Artificial, Robótica, Internet de las Cosas, etc.) y diseñar un plan de desarrollo tecnológico para transformar la atención de Salud en Chile, mejorando la eficiencia, alcance y efectividad de los servicios de Salud.	3.1 Generación de planes de prevención y atención personalizados 3.2 Generación de condiciones para la salud virtual 3.3 Sistema Colaborativo Público-Privado
Definición de información clínica y logística para la investigación y gestión	Desarrollar un plan de desarrollo tecnológico y normativo para disponibilizar información habilitante que permita a Universidades, ONG, centros de excelencia, empresas privadas y cualquier tipo de organización interesada, generar nuevos conocimientos e información con valor agregado para el cuidado y prevención contra enfermedades.	4.1 Determinación de la estructura mínima de datos y procedimiento de reserva de protección de datos sensibles 4.2 Política de donación de datos para la investigación clínica. 4.3 Creación de un Maestro de Personas Aseguradas en Salud único para Chile. 4.4 Creación de un Centro Nacional de Big Data Sanitaria para investigación y desarrollo.
Desarrollo y reconocimiento de Capital Humano para TICs de Salud	Proponer una ruta de formación y certificación de personal usuario y administrador de sistemas tecnológicos en salud en los prestadores de atención a nivel nacional.	5.1 Estudio y promoción de Capital Humano TIC Salud 5.2 Formación y certificación TIC Salud

Referencia: Elaboración propia

El contenido de las iniciativas se describe más abajo.

Para cada una de las iniciativas el documento indica los actores clave del contexto institucional asociado a la salud, que deben hacerse cargo de la implementación de cada medida. Además, y muy importante, se indica cuál de las instituciones mencionadas debe liderar la iniciativa:

1.1 Guías de Implantación

- Para el intercambio de información entre instituciones de salud es indispensable definición para estandarización de datos a nivel central.
- Consistirá en elaboración de guías técnicas para el intercambio/tratamiento de información. Dependen de casos de uso (ficha clínica, farmacológico) e incluye definiciones de estándares.

1.2 Maestro de Pacientes y Prestadores

- La evidencia internacional destaca la importancia de la construcción de un Maestro de Pacientes y un Maestro de Prestadores para la implementación de proyectos de interoperabilidad en salud.
- Permiten la identificación inequívoca y en tiempo real de personas e instituciones de salud.

2.1 Creación de la Agencia de Gestión Digital en Salud

- Crear agencia que lidere la estrategia digital en salud y sea capaz de adaptarse constantemente tanto a las necesidades sanitarias como a los avances tecnológicos, con coordinación público-privada.
- Se requiere una institucionalidad permanente e independiente, con facultades de coordinación y ejecución (Benchmarking de 9 países).

2.2 Estandarización de compra o contratación de bienes y servicios TIC en salud

- Levantar necesidades de compra y generar set de bases técnicas y administrativas para conjunto acotado de bienes y servicios TIC que requieren establecimientos de salud.

3.1 Generación de planes de prevención y atención personalizados

- Confeccionar planes de prevención personalizados, a través de análisis de las fichas clínicas electrónicas y uso de técnicas de Big Data/Analítica e IA (inteligencia artificial), incentivando la prevención por sobre el tratamiento de las enfermedades.
- Esto significa clusterizar y generar métricas de mejoras en cada grupo de población.
- Motivar la prevención y tratamiento utilizando herramientas de ludificación (activar aprendizaje y evaluar a individuos concretos según sus méritos).

3.2 Generación de condiciones para la salud virtual

- Para descongestionar la atención de salud, una de las principales medidas pasa por descentralizar la atención. Para ello es necesario pasar desde un esquema centrado en los centros de salud a uno orientado a los domicilios de los pacientes.
- Es necesario que exista cobertura a dichas prestaciones (aranceles) y protocolos de estandarización.

3.3 Sistemas Colaborativos Público-Privado

- Sistema colaborativo público-privado para tener una experiencia positiva, integrando a los actores del ecosistema que tengan relación con el paciente en cualquier punto del acto de salud (atención, fármacos, rehabilitación, control crónico, incapacidad).

4.1 Determinación de estructura mínima de datos y procedimiento de reserva de protección de datos sensibles

- Determinar una estructura mínima de intercambio de datos y dar cumplimiento a la Ley 19.628.
- Determinar una política de de-identificación y/o anonimización de los campos de dicha estructura mínima de datos, que permitan una identificación de los titulares de los datos. Existen definiciones iniciales, pero es necesario ajustar a estándares.

4.2 Política de donación de datos para la investigación clínica

- La propiedad de los datos de las fichas clínicas es de las personas
- Incorporar, en el proceso de Inscripción en el seguro de salud (FONASA/ISAPRES), el consentimiento informado voluntario de uso de datos sanitarios, para la gestión e investigación clínica.

4.3 Creación de un Maestro de Personas Aseguradas en Salud único para Chile

- La evidencia internacional destaca la importancia de la construcción de un Maestro de Pacientes para la implementación de proyectos de interoperabilidad en salud.
- Permiten la identificación inequívoca y en tiempo real de personas e instituciones de salud.

4.4 Creación de un Centro Nacional de Big Data Sanitaria para la investigación y el desarrollo

- Creación de una Política de Open Data Sanitaria, bajo la figura de un Centro Nacional de Big Data Sanitario.

5.1 Estudio y promoción de Capital Humano TIC Salud

- Identificar las necesidades de capital humano TIC salud en Chile (brechas, competencias, nuevos roles/perfiles y escalafón renta).
- Incluye la promoción y concientización de la necesidad de incorporarlas en el sector salud.

5.2 Formación y certificación en TIC Salud

- Desarrollar una oferta formativa y de certificación que sea coherente con las necesidades presentes y futuras de las instituciones de salud en materia TIC, en el contexto de las industrias 4.0.

4. UN INTENTO DE CLASIFICACIÓN DE LA INGENIERÍA BIOMÉDICA

La ingeniería biomédica o ingeniería médica es un campo de rápido crecimiento en el que los ingenieros juegan diferentes roles; a modo de ejemplo, los ingenieros informáticos analizan datos genéticos para encontrar indicios de cáncer, los ingenieros eléctricos construyen láseres para realizar mejores diagnósticos médicos, los ingenieros civiles diseñan mejores válvulas cardíacas, los ingenieros mecánicos desarrollan prótesis y los ingenieros químicos desarrollan fármacos más eficaces.

En este capítulo se presenta una propuesta de clasificación de esta especialidad, atendiendo a las disciplinas científicas incluidas en su estudio y a su objetivo final.

4.1 Áreas de Estudio de la Ingeniería Biomédica

En este aspecto existe un nivel similar de confusión, entre los campos que la componen y sus contenidos, al que existe en las Ingenierías de las ciencias de la vida por lo que en este capítulo se presenta una propuesta de ordenamiento de los términos utilizados y sus alcances.

En este informe se propone clasificar la Ingeniería Biomédica en las siguientes ramas, considerando las disciplinas científicas involucradas y su objetivo final en: Ingeniería Clínica, Informática Médica, Ingeniería de Tejidos, Ingeniería Farmacéutica, Ingeniería de Rehabilitación, Bioinformática, Biomecánica, Ingeniería Neuronal, Ingeniería de Biomateriales e Instrumentación Biomédica.

En la tabla siguiente se presentan las características de las diferentes ramas de especialización, las que se explican a continuación.

Tabla 4: Ramas de la Ingeniería Biomédica

Área de estudio	Disciplinas involucradas y objetivo final
Ingeniería Clínica	Aplicación de la ingeniería y los conocimientos de gestión a la tecnología sanitaria para asegurar que los equipos e instalaciones sean utilizados de manera efectiva y eficiente, cumplan con las normativas legales, técnicas, de seguridad y salud laboral y se encuentren en condiciones de operación adecuadas.
Informática Médica	Aplicación de la informática y las comunicaciones al área de la salud para optimizar la generación de conocimiento y la adquisición, almacenamiento, recuperación y utilización de la información en salud mediante el uso de Tecnologías de Información y Comunicaciones (TICS).
Ingeniería Biomecánica	Ingeniería mecánica y otras tecnologías aplicadas al estudio del comportamiento de los sistemas biológicos, en particular del cuerpo humano
Ingeniería de Rehabilitación	Aplicación de diferentes ciencias y principios de la ingeniería para diseñar, desarrollar, adaptar, probar, evaluar, aplicar y distribuir soluciones tecnológicas para ayudar a las personas con discapacidad y ayudar a la recuperación de las funciones físicas y cognitivas perdidas debido a enfermedades o lesiones.
Instrumentación Biomédica	Aplicación de las técnicas de la ingeniería y la medicina para diseñar y fabricar equipos utilizados en las diferentes especialidades médicas: Cardiología, Fisiatría, Neonatología, Anestesia, Audiología, Neurología, Dializado renal, Ginecoobstetricia, Radiología, Ultrasonido, Resonancia Magnética Nuclear, Medicina Nuclear.
Ingeniería de tejidos y Biomateriales	Utilización de técnicas de medicina, la biología, química, ingeniería de tejidos y ciencia de los materiales para restaurar y aumentar la función humana incorporando nuevos materiales.

Referencia: Elaboración propia

Ingeniería Clínica

Especialidad dentro de la ingeniería biomédica cuya función principal es apoyar y promover el cuidado del paciente mediante la aplicación de la ingeniería y los conocimientos de gestión a la tecnología sanitaria.

En sus diversas funciones, los Ingenieros Clínicos, forman una especie de "puente" entre los creadores de productos y los usuarios finales, combinando las perspectivas de estar cerca del punto de uso, mientras que también están capacitados en el diseño de productos y procesos.

El Ingeniero Clínico es un profesional que desempeña diferentes tareas para que una instalación sanitaria cumpla con su rol. Es responsable de que los equipos e instalaciones de un centro asistencial cumplan con las normativas técnicas, de seguridad y salud laboral y de que encuentre en adecuadas condiciones de operación.

El Ingeniero Clínico, además, asesora al equipo de proyecto en todos los aspectos relacionados con el diseño, ingeniería y tecnología de hospitales y centros de atención de salud, incluyendo: construcción, puesta en marcha y mantenimiento de edificios, plantas, equipos, maquinaria y aparatos.

Informática Médica

Es la aplicación de la informática y las comunicaciones al área de la salud, mediante el uso del software médico, con el objetivo principal de prestar servicio a los profesionales de la salud para mejorar la calidad de la atención sanitaria.

Esta disciplina se ocupa de los recursos, dispositivos y métodos necesarios para optimizar la adquisición, almacenamiento, recuperación y utilización de la información en salud y en biomedicina. Incluye, además de hardware y software, el desarrollo de guías de práctica clínica, terminología médica formal y de sistemas de información y comunicación.

La informática médica se apoya en las tecnologías de la información y comunicación (TICs). Por ello se denomina también e-salud, telesalud y telemedicina.

Ingeniería Biomecánica

La Ingeniería Biomecánica es el conjunto de conocimientos interdisciplinarios generados al utilizar la mecánica y otras tecnologías al estudio del comportamiento de los sistemas biológicos, en particular del cuerpo humano, y a resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido.

La Ingeniería Biomecánica analiza la adecuación y funcionamiento de las estructuras de carácter mecánico que existen en el cuerpo humano. La ingeniería biomecánica es una de las múltiples aplicaciones de la ingeniería en la medicina. La ingeniería biomecánica utiliza para su desarrollo conocimientos de mecánica, ingeniería, anatomía, fisiología y otras disciplinas.

El siguiente capítulo está dedicado a esta área de la ingeniería biomédica, donde se abordará con mayor detalle y se analizarán las oportunidades que representa para la ingeniería.

Instrumentación Biomédica

Es el área que estudia el conocimiento de la aplicación y del funcionamiento de casi todos los equipos y sistemas usados en las instituciones de salud, incluyendo laboratorios clínicos y centros de imagenología, para las diferentes especialidades médicas: Cardiología, Fisiatría, Neonatología, Anestesia, Audiología, Neurología, Dializado renal, Ginecoobstetricia, Radiología, Ultrasonido, Resonancia Magnética Nuclear, Medicina Nuclear, los sistemas protésicos inteligentes, el

equipamiento y aplicación de sistemas psicofisiológicos, los principios de la telemedicina, la robótica médica.

Ingeniería de Rehabilitación

La ingeniería de rehabilitación es la aplicación sistemática de las ciencias y principios de la ingeniería para diseñar, desarrollar, adaptar, probar, evaluar, aplicar y distribuir soluciones tecnológicas para ayudar a las personas con discapacidad y ayudar a la recuperación de las funciones físicas y cognitivas perdidas debido a enfermedades o lesiones. Cabe mencionar que la ingeniería de rehabilitación puede extender su alcance hacia el concepto de capacidades aumentadas (human enhancement).

Las áreas funcionales que pueden ser abordadas a través de la ingeniería de rehabilitación pueden incluir: movilidad neuromuscular, comunicación y lenguaje, audición, visión y cognición y actividades asociadas con el empleo, la vida independiente, la educación y la integración en la comunidad.

La ingeniería de rehabilitación aplicada al sistema nervioso (o ingeniería neuronal) utiliza técnicas de ingeniería para entender, reparar, reemplazar o mejorar los sistemas neuronales.

El campo de la ingeniería neuronal se basa en los campos de la neurociencia computacional, la neurociencia experimental, la neurología clínica, la ingeniería eléctrica y el procesamiento de señales del tejido neural vivo, y abarca elementos de robótica, cibernética, ingeniería informática, ingeniería de tejidos neuronales, ciencia de materiales y nanotecnología.

Los objetivos más destacados en el campo incluyen la restauración y el aumento de la función humana mediante interacciones directas entre el sistema nervioso y los dispositivos artificiales.

Mucha investigación actual se centra en la comprensión de la codificación y el procesamiento de la información en los sistemas sensoriales y motores, cuantificando cómo se altera este procesamiento en el estado patológico, y cómo se puede manipular a través de interacciones con dispositivos artificiales, incluyendo interfaces cerebro-ordenador y neuroprótesis.

Ingeniería de tejidos y biomateriales

La ingeniería de tejidos es una rama dentro de la Ingeniería Biomédica que utiliza una combinación de células, ingeniería y métodos de materiales y factores bioquímicos y fisicoquímicos adecuados para mejorar o reemplazar los tejidos biológicos.

El término medicina regenerativa se utiliza a menudo como sinónimo de ingeniería de tejidos, aunque los involucrados en la medicina regenerativa ponen más énfasis en el uso de células madre o células progenitoras para producir tejidos.

La ingeniería de tejidos implica el uso de diferentes elementos para la formación de nuevo tejido viable para un propósito médico. Si bien la mayoría de las definiciones de ingeniería de tejidos cubre una amplia gama de aplicaciones, en la práctica el término está estrechamente asociado con aplicaciones que reparan o reemplazan porciones de tejidos enteros tales como: hueso, cartílago, vasos sanguíneos, vejiga, piel o músculo, entre otras.

Un biomaterial es cualquier materia, superficie o construcción que interactúa con los sistemas vivos, su estudio se llama ciencia de biomateriales o ingeniería de biomateriales y su ámbito de estudios abarca elementos de la medicina, biología, química, ingeniería de tejidos y ciencia de los materiales.

Esta área ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años. Actualmente existen muchas empresas que están invirtiendo grandes cantidades de dinero en el desarrollo de nuevos productos.

5. INGENIERÍA BIOMECÁNICA

La Ingeniería Biomecánica es el conjunto de conocimientos interdisciplinarios generados al utilizar la mecánica⁽¹⁰⁾ y otras tecnologías, primero al estudio del comportamiento de los sistemas biológicos, en particular del cuerpo humano, y segundo a resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido (Donskoi y Zatsiorski, 1988).

La Ingeniería Biomecánica analiza la adecuación y funcionamiento de las estructuras de carácter mecánico que existen en el cuerpo humano. La ingeniería biomecánica es una de las múltiples aplicaciones de la ingeniería en la medicina, dada principalmente por nuevos métodos diagnósticos.

Es importante considerar que la ingeniería biomecánica corresponde a un área interdisciplinaria, en la cual se trabaja e investiga tanto con tejidos naturales, como con elementos mecánicos artificiales. La ingeniería biomecánica utiliza para su desarrollo conocimientos de mecánica, ingeniería, anatomía, fisiología y otras disciplinas, como se ve en el siguiente gráfico. (Donskoi y Zatsiorski, 1988).

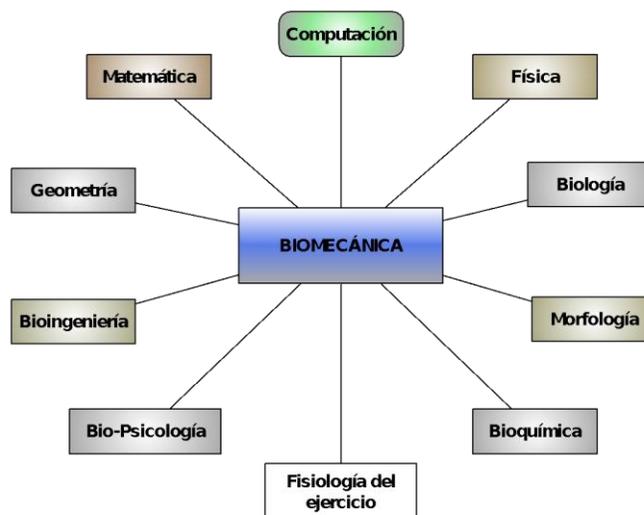


Gráfico 1: Ámbitos de acción de la biomecánica

Fuente: (Donskoi y Zatsiorski, 1988)

En esta misma línea, la biomecánica analiza los elementos mecánicos incorporados a la estructura biológica de un ser vivo. Básicamente esta ciencia le permite al ingeniero incorporarse al estudio de los sistemas biológicos usando conocimientos mecánicos como la resistencia de materiales, teoría de máquinas, dinámica, estática, diseño, ciencia de los materiales, etc., apoyándose en ciencias como la medicina, anatomía, biología, entre otras, como se muestra en el siguiente gráfico.

¹⁰ con el apoyo de otras ciencias biomédicas

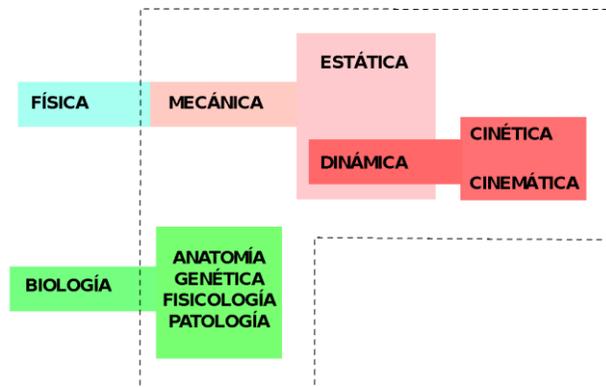


Gráfico 2: Relación entre ingeniería biomecánica y otras disciplinas de la ingeniería y la medicina.

Fuente: Elaboración propia

La biomecánica se globaliza como ciencia ya en el primer seminario internacional en Zurich en 1967, auspiciado por la UNESCO. Actualmente esta ciencia se ha consolidado como el área de la bioingeniería con la mayor expansión y aplicación en el mundo. Son tantos los avances que existe una multitud de revistas especializadas en biomecánica. Entre las de mayor prestigio están el Journal of Biomechanics, Biomechanik Sportlicher Bewegungen, Clinical Biomechanics y Journal of Sport Biomechanics.

La ingeniería biomecánica se ubica entre la biología y la ingeniería mecánica e incluso la medicina. La mecánica tiene aplicaciones en el campo de la Biología y viceversa, lo que es necesario para la comprensión de esta disciplina.

La ingeniería biomecánica se divide en cuatro áreas:

5.1 Biomecánica médica o clínica

Estudia los sistemas biológicos, evaluando las patologías que aquejan al cuerpo humano para generar soluciones capaces de valorarlas, repararlas o paliarlas, mejorando la calidad de vida de las personas y solucionando necesidades del contexto social en el campo biomédico. Estudia el flujo sanguíneo y el comportamiento mecánico de los vasos. El impacto social de las enfermedades cardiovasculares y, en particular, de la aterosclerosis justifica el interés de ofrecer asistencia por computador al diagnóstico y a la terapia cardíaca. En este campo se han desarrollado las técnicas de análisis del movimiento, músculo-esquelético, de tejidos, cardíaco, vascular y respiratorio; desarrollo de biomateriales.

Un ejemplo de lo anterior es el Instituto de Ingeniería Biológica y Médica de la Pontificia Universidad Católica de Chile que, en el área de Biomecánica y Fisiología Cuantitativa, está buscando desarrollar el estudio de las estructura y funciones de los sistemas biológicos utilizando principios y métodos de la mecánica, e implementando también una perspectiva ingenieril basada en modelos matemáticos. Los estudios se han basado en la comprensión de sistemas por la integración de técnicas experimentales de alto rendimiento, procesamiento de datos y modelos computacionales.

Uno de los avances en esta materia es la creación de una plataforma computacional para medir la deformación local de los pulmones inducidos por ventilación mecánica (Concha et al., 2018). Otro es la cuantificación del flujo cardiovascular a través de imágenes de resonancia magnética, con el

fin de explicar los efectos en enfermedades como la esclerosis múltiple, rupturas de aneurismas o trombosis (Dux-Santoy et al., 2019). Además, se ha desarrollado el estudio del comportamiento eléctrico del corazón, proponiendo modelos matemáticos que permiten realizar una representación de éste (Hurtado et al., 2017; Hurtado and Rojas, 2018).

Asimismo, grupos de investigación del instituto han observado las respuestas de las neuronas ante lesiones en la médula espinal por medio del estudio de modelos de sistemas neuronales de insectos, que se asemejan al funcionamiento de la médula humana (Meléndez-Gallardo and Eblen-Zajjur, 2016). Ello hace posible generar un prototipo de red de neuronas por medio de micro neurotransmisores y así, aplicar las interpretaciones a reacciones del sistema nervioso del ser humano (Meléndez-Gallardo and Eblen-Zajjur, 2018).

5.2 Biomecánica ocupacional (Fisioterapéutica)

Analiza la relación mecánica que el cuerpo sostiene con elementos con que interactúa en los diversos ámbitos, para adaptarlos a sus necesidades y capacidades, así como para la búsqueda de soluciones. En este contexto se relaciona con otra disciplina como la ergonomía física, que consiste en el equilibrio entre las capacidades de los trabajadores y las demandas del trabajo con el objetivo de mejorar la calidad de vida del trabajador, su salud, bienestar, seguridad y productividad.

Biomecánica deportiva

Es la aplicación de la mecánica, como parte de la física, en la investigación y desarrollo de los movimientos del atleta en la realización de los ejercicios físicos. Tiene como objetivo la evaluación del gesto deportivo, el análisis de la práctica deportiva para mejorar su rendimiento, el desarrollo de técnicas de entrenamiento, el diseño de complementos, materiales y equipamiento de altas prestaciones. Es el área a través de la cual se adquiere una mejor comprensión de las actividades y ejercicios, e interviene en la prevención de lesiones, en la mejora del rendimiento, en la descripción de la técnica deportiva y, además, desarrolla nuevos materiales para la rehabilitación.

Los principales aportes de la biomecánica en el área médica y deportiva se muestran en los resultados de diferentes estudios e investigaciones realizadas para solucionar problemas, tales como:

- la corrección de ejes posturales,
- la prevención de diversos tipos de tendinitis o las tenosinovitis,
- la prevención de periostitis,
- la prevención de dolores articulares como las bursitis,
- la prevención de lesiones producidas por choques a partir del diseño de dispositivos protectores,
- el aumento del rendimiento deportivo a corto y largo plazo,
- el diseño de prótesis,
- el diseño de calzado y vestimenta con fines específicos
- el diseño de instrumentos y técnicas para la medición y control de indicadores corporales y del resultado de acciones deportivas en estrecha relación con la metrología deportiva entre otras ciencias aplicadas a la medicina o al deporte como la electromiografía, las plataformas de fuerza, los equipos para la valoración de la discapacidad y la valoración de la fuerza muscular.

Biomecánica forense

Actualmente, la biomecánica forense. La biomecánica forense es una disciplina relativamente reciente y de creciente aplicación en los accidentes de tráfico y en el ámbito laboral, que aplica sus conceptos para determinar mecanismos causales que aclaren el modo en que se produjeron las lesiones.

5.3 Métodos y aparatos utilizados en ingeniería biomecánica

Entre los métodos utilizados en la ingeniería biomecánica, que permiten estudiar las diferentes formas de movimientos, se encuentra la electromiografía, la cinemática, la dinámica y la antropometría.

Electromiografía

La electromiografía es un método de estudio que ha jugado un papel importante en las últimas décadas en la aplicación de la ingeniería biomecánica, siendo utilizada en diferentes áreas, concentrándose en la actividad neuromuscular. El fundamento de este método es la termo electromiografía, que representa en forma gráfica la actividad eléctrica del músculo cuando se contrae por acción de un impulso nervioso.

Cinemática

Consiste en una serie de métodos que permiten medir y estudiar parámetros cinemáticos del movimiento, con cuya adquisición se realizan cálculos de posición, orientación, velocidad y aceleración del cuerpo. Como se ve, la cinemática constituye un área de evaluación biomecánica que se concentra en mayor medida en la descripción del movimiento, y no en las fuerzas que los produzcan.

Dinámica

Al contrario de la cinemática, la dinámica considera todos los tipos de medidas de fuerza y distribución de la presión, haciendo posible con esto inferir las respuestas del comportamiento dinámico del movimiento humano. Además de estos parámetros para interpretación de las fuerzas de reacción externa, la dinámica se enfoca en comprender la distribución de la fuerza de interacción entre el cuerpo y el medio ambiente.

Antropometría

La antropometría se concentra en determinar las características y propiedades del aparato locomotor, como las dimensiones de las formas geométricas de segmentos corporales, la distribución de la masa, los brazos de palanca y las posiciones articulares. Esto permite definir un modelo antropométrico de acuerdo con los parámetros necesarios para la construcción de un modelo biomecánico de la estructura analizada.

La ingeniería biomecánica también relaciona la biología de los seres humanos con la mecánica de ingeniería, surgiendo así la biomecánica industrial. Un ingeniero biomecánico puede estudiar cómo reacciona el cuerpo humano ante un accidente automovilístico (o de cualquier otra índole) y analizar si las medidas de seguridad en accidentes de tráfico son suficientes o incluso perjudiciales.

Mediante la evaluación de los accidentes en el contexto de este tipo de ingeniería, se pueden mejorar las medidas de seguridad, tanto para conductores como pasajeros.

Por lo tanto, existen ingenieros biomecánicos trabajando en la reconstrucción de accidentes, lo que les permite aplicar los principios de ingeniería en la evaluación de factores humanos, análisis de fallos, e incluso la evaluación de las pruebas basadas en la lesión, todo lo cual es relevante en el caso durante un proceso judicial, particularmente en el contexto del paradigma “Cero muertes por accidentes de tránsito” que se está aplicando en varias ciudades del mundo.

5.4 Biomecánica Computacional

La biomecánica computacional intenta utilizar los medios informáticos para simular los sistemas biológicos. Generalmente se usan modelos sólidos para simular comportamientos cinemáticos y además modelos de elementos finitos para simular propiedades de deformación y resistencia de los tejidos y elementos biológicos.

Dibujar órganos en una computadora no es tan fácil como el dibujo de una pieza de ingeniería, pues no se dispone de planos que permitan al ingeniero realizar un diseño exacto. En la biomecánica computacional se necesita tecnología adicional. La modelación más común para los órganos tratados en forma digital es el Método de Elementos Finitos (FEM) (Prendergast, 1997). Sin embargo, a pesar de que hay computadores de gran potencia, la modelación aún no alcanza el 100% de la realidad pues las mallas que se generan no logran adaptarse a las formas irregulares de los órganos y por ello se pierde o distorsiona mucha información de la geometría y de las propiedades. La reconstrucción virtual de órganos es tal vez la base común de todas las aplicaciones de la biomecánica computacional debido a que, para cualquier aplicación, el primer paso es precisamente la construcción de la forma del órgano que se quiere analizar.

Los departamentos de biomecánica se concentran en la simulación del cuerpo humano para el análisis de patologías o para el estudio de eficiencia de algún elemento artificial (prótesis). Otra de las líneas de investigación en que se está trabajando es la simulación computacional del comportamiento mecánico de tejidos como huesos, tendones, ligamentos y músculos. Una mejor comprensión del comportamiento de los tejidos involucrados en lesiones del aparato locomotor facilita en muchos casos la elección del tratamiento.

Como conjunción de todo lo anterior se están planteando herramientas de reconstrucción y simulación integral de sistemas completos (articulaciones, órganos específicos, etc.) que permitirán, junto a las técnicas de realidad virtual, la simulación de operaciones previendo los efectos de distintas actuaciones, lo que está dando como resultado la rápida configuración de una nueva disciplina como es la de “Planificación Preoperatoria”, o las denominadas “cirugías virtuales”.

Los procesos de desarrollo de órganos y remodelación de tejidos se ven influenciados por múltiples factores que van desde el componente biológico hasta la mecánica propia del sistema, donde cada uno afecta en mayor o menor medida, dependiendo del tipo de ente orgánico que se estudie. Desde esta perspectiva se ha desarrollado un nuevo campo de estudio de la bioingeniería denominado mecanobiología (Garzón-Alvarado et al., 2009). Esta nueva área de trabajo involucra el estudio de modelos y la realización de experimentos con el ánimo de entender los procesos complejos que se dan en la génesis y mantenimiento de órganos y tejidos. Gracias a esta disciplina se han logrado aislar y analizar diversos efectos como la genética, los factores moleculares autocrinos y paracrinos, las cargas mecánicas sobre órganos y los efectos electromagnéticos. Con

este conocimiento se han construido nuevos modelos matemáticos que pueden simular, de forma aproximada, el comportamiento *in vivo*.

La biomecánica computacional ha servido en múltiples áreas de la medicina, aplicando la mecánica como herramienta de análisis. Sin embargo, la mayor aplicación de esta área ha sido en la solución de problemas ortopédicos y en la comprensión del sistema musculoesquelético, lo que ha llevado a la creación de varios grupos de trabajo en el mundo, cuyos principales investigadores son Dennis Carter del grupo de biomecánica de la universidad Stanford de los EEUU, Peter Hunter del grupo de bioingeniería de la Universidad de Auckland de Nueva Zelanda, Stephen Cowin del City College de Nueva York EEUU, Rik Huiskes de la división de Ingeniería Biomédica de la Universidad Técnica de Eindhoven de Holanda, Manuel Doblaré del grupo de Estructura y Modelado de Materiales de la Universidad de Zaragoza de España, entre otros.

En estos grupos, la investigación en biomecánica se ha dividido específicamente en simulación de músculo, tendones y ligamentos (también denominados tejidos blandos) y simulación de huesos (tejido duro). Además, se han realizado, en menor medida, otras simulaciones como son modelos de corazón, venas y arterias (que están enmarcados como tejido blando) e investigación celular (mecánica celular).

5.5 Mecanobiología computacional

La mecanobiología computacional determina las reglas cuantitativas que gobiernan las acciones celulares para su expresión, diferenciación y mantenimiento ante estímulos biológicos y mecánicos, que pueden simularse mediante métodos numéricos. El procedimiento para hallar dichas reglas es habitualmente mediante el proceso de "prueba-error" (van der Meulen and Huiskes, 2002). Los ensayos computacionales se simulan a partir de problemas de valor en el contorno, mediante los cuales las cargas mecánicas sobre el contorno se trasladan a variables mecánicas locales como deformaciones y tensiones. Desde el punto de vista biológico, estas variables mecánicas locales o biofísicas estimulan la expresión celular para regular, por ejemplo, la composición de la matriz y la expresión de sustancias moleculares. Tanto el aspecto biológico como el mecánico se combinan en un modelo computacional, que considera la aplicación de fuerzas, la mecano transducción, la expresión celular, la genética y la transformación de las características de la matriz extracelular.

A diferencia de los problemas tradicionales de la ingeniería, donde el cálculo numérico produce una respuesta a un fenómeno conocido, en la mecanobiología se ensayan diferentes relaciones matemáticas, variables de entrada y estímulos biofísicos para simular el comportamiento de un tejido u órgano. De esta forma se establecen hipótesis, cuya simulación permite verificar su plausibilidad a la luz de las evidencias experimentales existentes, que muchas veces son incompletas e insuficientes para verificarlas fuera de duda, abriéndose entonces nuevas vías de experimentación (Huiskes, 1995). Por ello, la simulación numérica ha sido recientemente citada como "El tercer método de la ciencia", después de la lógica (teórica) y la experimentación.³⁹

5.6 Aplicaciones

Las aplicaciones en biomecánica van desde el diseño de simples cinturones de seguridad en autos hasta dispositivos médicos para la circulación artificial en operaciones de trasplantes de corazón. El campo de acción de la biomecánica se encuentra directamente relacionado con la rehabilitación y mejora de prestaciones motrices, el diseño de prótesis (Gámez et al., 2016), órtesis y el estudio tensional de materiales biológicos y biocompatibles. Una gran aplicación fue el denominado “pulmón de acero”, primer dispositivo de respiración artificial que salvó la vida de algunos enfermos de poliomielitis. La biomecánica interviene en el desarrollo de implantes y órganos artificiales. Se han desarrollado prótesis mioeléctricas para extremidades de enfermos amputados, movidas por pequeños motores eléctricos estimulados por sistemas electrónicos que recogen las señales musculares.

Uno de los avances más importantes de la medicina de las últimas décadas son las prótesis articulares, que permiten sustituir articulaciones destruidas por diferentes enfermedades reumáticas mejorando, de forma radical, la calidad de vida de los pacientes. Han obtenido gran éxito clínico las de cadera y rodilla, y algo menos las de hombro.

El desarrollo de implantes artificiales para tratar fracturas ha revolucionado el mundo de la traumatología: su enorme variedad incluye tornillos, agujas, placas atornilladas, clavos intramedulares y sistemas de fijación externa. Todos requieren un estudio biomecánico pormenorizado previo al ensayo y aplicación clínica. También se están desarrollando corazones artificiales; desde 1982 muchos pacientes han sido tratados con tales dispositivos con éxito.

Las referencias de este capítulo pueden encontrarse en el Anexo.

6. INSTRUMENTACIÓN BIOMÉDICA

La instrumentación biomédica o bioinstrumentación es un área de la ingeniería biomédica que se enfoca en dispositivos para medir, evaluar y tratar sistemas biológicos. Las señales biológicas o bioseñales suelen ser pequeñas, por lo que son susceptibles de interferencias, que enmascaran información relevante. Para extraer la información relevante desde las señales biológicas, se requieren sofisticados equipos y técnicas de adquisición de datos, de manera de preservar fidedignamente la información y estructura de la señal de interés.

Las etapas involucradas en un sistema de bioinstrumentación se resumen en la Figura 6.1 y se describen a continuación.

Inicialmente, las señales son detectadas en un medio biológico por medio de un sensor que convierte una variable física, química o biológica en eléctrica, funcionando como una interfaz entre los sistemas biológicos y los instrumentos de adquisición electrónicos. Luego de que una bioseñal ha sido detectada, por el sensor apropiado, es amplificada y filtrada; para el proceso de amplificación se suelen utilizar componentes electrónicos denominados amplificadores operacionales que aumentan la amplitud de una bioseñal, que luego puede ser procesada por un filtro analógico para compensar las distorsiones provocadas por el sensor o para cumplir con las condiciones técnicas del sistema de adquisición de datos. La etapa que sigue es la conversión analógica-digital (A/D), que transforma la señal analógica-continua registrada por el sensor (y posteriormente amplificada y filtrada) en una señal digital-discreta que es una aproximación de la señal original. Esta señal digital y discreta es una secuencia numérica que puede ser fácilmente almacenada y procesada en los computadores.

Según la organización mundial de la salud (OMS), un dispositivo médico es cualquier artículo, instrumento, aparato o máquina utilizado en la prevención, diagnóstico o tratamiento de una enfermedad o condición, o utilizado para detectar, medir, restaurar, corregir o modificar una estructura o función del cuerpo humano con fines de salud. En ese sentido, es posible clasificarlos en 2 grupos: dispositivos diagnósticos y dispositivos terapéuticos.

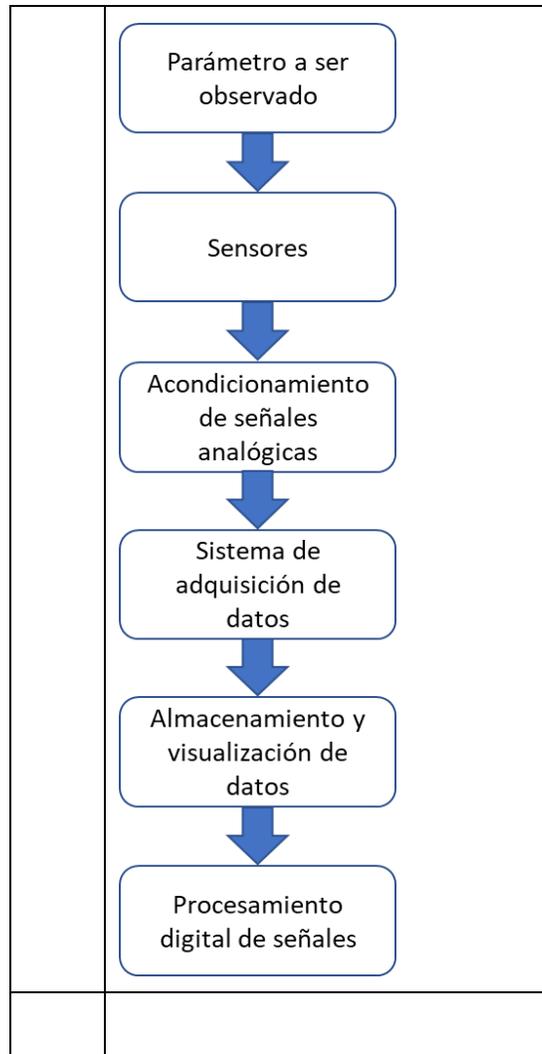


Gráfico 3: Etapas de un sistema de bioinstrumentación
Fuente: Elaboración propia

6.1 Dispositivos diagnósticos

Los sistemas de bioinstrumentación son utilizados rutinariamente en la práctica clínica para medir un amplio rango de variables fisiológicas, que entregan importante información diagnóstica. Se utilizan rutinariamente en hospitales y laboratorios clínicos para la medición y monitoreo de variables fisiológicas críticas de manera invasiva y no invasiva, in-vivo e in-vitro.

La medicina clínica ha ido migrando hacia operaciones más eficientes, reduciendo costos y mejorando la atención. En ese sentido, las pruebas diagnósticas se han movido desde laboratorios y centros externos hacia el paciente y el médico, de manera de contar con resultados de pruebas diagnósticas más cercanas al punto de atención.

La variedad de sensores biomédicos impacta positivamente en un amplio abanico de aplicaciones diagnósticas. Algunos de ellos se utilizan en laboratorios clínicos para medir cantidades de

electrolitos, enzimas y otros metabolitos en la sangre. Otros sensores que miden presión, flujo y concentraciones de gases se utilizan para monitorear continuamente la condición de un paciente.

Algunos ejemplos de instrumentación diagnóstica son: electrocardiógrafos (ECG), esfigmomanómetros, espirómetros, oxímetros de pulso, etc. Hay también equipos que agrupan varios de estos dispositivos, como los monitores multiparámetros (ECG, spO₂, PANI, otros).

Destaca, además, el amplio abanico de imágenes médicas, considerando las diferentes modalidades y procesos para visualizar el cuerpo humano con propósitos diagnósticos y terapéuticos, así como también de seguimiento de patologías o condiciones.

Las decisiones clínicas que se puedan tomar a nivel preventivo, curativo y paliativo dependen de un correcto diagnóstico, y en este sentido las imágenes médicas juegan un papel fundamental en el cuidado de la salud, pues permiten confirmar, manejar correctamente y documentar una amplia variedad de enfermedades y condiciones.

Dentro de las modalidades más destacadas de la imagenología médica, podemos encontrar: radiografía, resonancia magnética, medicina nuclear, ultrasonografía, endoscopia y termografía.

6.2 Dispositivos terapéuticos

Son aquellos en que los desarrollos están destinados a tratamientos de los pacientes, desde enfermedades incurables hasta aquellas en que su uso es solo transitorio. De acuerdo con su grado de dependencia para el soporte vital, estos equipos se dividen en críticos y no-críticos:

Dispositivos médicos críticos: Aquellos en los que una falla puede resultar en la muerte o que generan secuelas importantes.

- **Ventiladores mecánicos:** Mueven aire respirable hacia dentro y fuera de los pulmones, para dar respiración a pacientes que son incapaces de respirar o lo hacen deficientemente. Mediante presión positiva, se genera una mezcla de aire médico y oxígeno, hasta que se alcanza un cierto umbral de presión o volumen. Este sistema puede ser totalmente autónomo o puede ser usado para complementar los esfuerzos respiratorios del paciente.
- **Incubadoras:** Es un equipo usado para mantener condiciones ambientales acordes para un neonato (prematuro o de término), cuyas funciones incluyen, al menos, oxigenación, temperatura y humedad.
- **Máquinas de anestesia:** Dispositivo médico cuya función es generar una mezcla de gases médicos y agentes anestésicos inhalables con el propósito de inducir y mantener la anestesia. Se suele combinar su uso con el de los ventiladores mecánicos.
- **Máquinas de circulación extracorpórea (Extracorporeal membrane oxygenation, ECMO):** Grupo de equipos médicos, cuya función es proveer de soporte cardíaco y respiratorio a pacientes con corazón y pulmones incapaces de llevar a cabo el intercambio gaseoso o perfusión de sangre para sostener la vida. Estos equipos reciben la sangre del paciente, remueven el dióxido de carbono y oxigenan los glóbulos rojos, para finalmente retornar la sangre al paciente.
- **Máquinas de diálisis:** Son equipos que remueven el exceso de agua, solutos y toxinas de la sangre de paciente cuyos riñones no funcionan adecuadamente. Similar a las máquinas de

ECMO, toman la sangre del paciente, la filtran y luego la devuelven al torrente sanguíneo del paciente.

- **Desfibriladores cardíacos:** Entregan una dosis de corriente eléctrica al corazón para terminar con una disritmia (fibrilación o taquicardia ventriculares) y para que el marcapasos natural del corazón (nodo sinoauricular) restablezca su ritmo sinusal normal. Un derivado de estos equipos es el cardioversor cardíaco, que se sincroniza con el ciclo cardíaco para realizar la descarga eléctrica.
- **Bombas de insulina:** Dispositivo médico utilizado para la administración subcutánea de insulina en el tratamiento de diabetes mellitus. Posee un sensor de glicemia, un sistema de control y una bomba con depósito de insulina.
- **Marcapasos artificial:** Es un dispositivo que genera impulsos eléctricos y los envía al corazón a través de electrodos para alcanzar la contracción cardíaca y bombear sangre. Es un sistema que reemplaza y/o regula la función del sistema de conducción eléctrica del corazón.

Dispositivos terapéuticos no-críticos:

- **Bombas de infusión:** Entrega de fluidos, medicamentos o nutrientes al sistema circulatorio del paciente de una manera controlada y precisa en 2 posibles modos: continuo o intermitente. Puede ser usado por vía intravenosa, subcutánea, arterial, epidural y parenteral.
- **Máquinas de electrocirugía:** Dispositivos médicos que utilizan corriente eléctrica de alta frecuencia y de polaridad alternada para cortar, coagular, disecar y fulgurar tejido. Permite realizar cortes precisos con un mínimo sangrado. Dentro de esta familia, destacan: láser, electrobisturías y equipos de ablación.
- **Máquinas de terapia física:** Algunos de estos dispositivos, como los de movimiento pasivo continuo, se utilizan en las primeras fases de recuperación luego de una cirugía o un trauma, para recobrar el control, rango de movimiento y reducir la inflamación de la zona afectada.

Derivados de la Bioinstrumentación

Los avances en bioinstrumentación han permitido el desarrollo de diversas tecnologías relacionadas, algunas de las cuales se explican a continuación.

Monitoreo en tiempo real

Muchas enfermedades son diagnosticadas utilizando información de un momento en particular de la vida del paciente, es decir, que no permite una visión global de lo que sucede en el cuerpo; sin embargo, el monitoreo en tiempo real ofrece la posibilidad de recopilar información momento a momento logrando un mejor entendimiento de la condición de salud.

El automonitoreo por parte del paciente usando sensores biomédicos tiene el potencial para impactar el cuidado de cualquier enfermedad crónica, teniendo un monitoreo continuo en vez de visitas periódicas al hospital, lo que permite una respuesta más rápida y un mejor control.

Sistemas de soporte a la decisión clínica

Corresponden a herramientas computacionales que asisten, facilitan o toman decisiones clínicas. Estos sistemas impactan en la práctica clínica y en la salud pública, y pueden ayudar en:

- Optimización en la asignación de recursos económicos
- Monitoreo remoto continuo
- Diagnóstico y elección de terapia
- Extensión de la eficiencia y eficacia del personal médico
- Estratificación de enfermedades
- Descubrimiento de nuevos agentes terapéuticos

Sistemas predictivos, detección temprana

Se encargan de detectar alteraciones en etapas iniciales y dar una alerta o hacer una corrección del problema en forma oportuna. Entre ellos se encuentran los sistemas de monitorización continua y preventiva del síndrome de apnea/hipopnea del sueño, donde varios sensores miden señales fisiológicas mientras el paciente duerme (respiración, movimientos del cuerpo), detectando cuando hace una pausa respiratoria que requiere apoyo ventilatorio.

6.3 Sensores biomédicos

Los sensores biomédicos convierten las señales biológicas en eléctricas y utilizan circuitos de amplificación y adecuación para su análisis posterior. Estos sensores se pueden clasificar según la naturaleza de la variable a medir en físicos, químicos, eléctricos y ópticos.

Sensores físicos

- Transductores de desplazamiento: Se utilizan para detectar cambios en longitud, presión o fuerza. Por ejemplo, para medir presión arterial o flujo sanguíneo.
- Transductores de flujo de aire: Son utilizados para monitorear volumen, flujo y tasas de respiración.
- Medición de temperatura: La temperatura corporal es una importante variable fisiológica para tener en cuenta, tanto la superficial como la central. Como sensores se utilizan termistores y termocuplas.

Sensores químicos

Sensores de gases sanguíneos

El monitoreo de gases sanguíneos (pO_2 y pCO_2) es importante en quirófanos y unidades de cuidado crítico de pacientes. Esta información es utilizada para ajustar la ventilación mecánica o la administración de medicamentos.

Sensores de pH

El pH hace referencia al balance entre ácido y base en una solución. La medición de pH sanguíneo es relevante en varios procedimientos diagnósticos, relacionados principalmente con el funcionamiento de pulmones y riñones. Los electrodos para medir pH pertenecen al grupo de sensores potenciométricos, es decir, que son sensores electroquímicos que generan un voltaje.

Sensores de biomoléculas

Desde el punto de vista clínico, existe una amplia variedad de moléculas de interés diagnóstico, como hormonas (Ej.: insulina, T4, etc.) o metabolitos (Ej.: creatinina, glucosa, etc.). El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la utilización de una enzima o microorganismo para reconocer un cierto elemento, unido a un sensor electroquímico u óptico que transforme este reconocimiento en una señal en eléctrica.

Sensores eléctricos

En los organismos biológicos, los potenciales iónicos generados por el flujo de electrolitos intra y extracelular, se denominan biopotenciales. Para medir biopotenciales, se utilizan electrodos especializados que funcionan como interfaz entre los potenciales generados en el cuerpo y el sistema electrónico de adquisición. Pueden ser no invasivos, que se posicionan en la superficie de la piel, o invasivos, utilizando agujas.

Los fluidos corporales pueden ser corrosivos para algunos materiales y algunos materiales son tóxicos para los tejidos vivos, por lo que los electrodos invasivos deben ser cuidadosamente diseñados. En cuanto a los no invasivos, se pueden utilizar materiales menos exigentes desde el punto de vista de la biocompatibilidad, sin embargo, deben sortear otros problemas, como una alta impedancia y mediciones inestables.

Los sensores de biopotenciales tienen múltiples aplicaciones, dentro de las que destacan:

- Electrocardiograma (ECG): Registra la actividad eléctrica del corazón
- Electromiograma (EMG): Registra la actividad eléctrica de los músculos
- Electroencefalograma (EEG): Registra la actividad eléctrica del encéfalo

Sensores Ópticos

Dentro de los sensores ópticos, los más destacados son los que se relacionan a imagenología médica, cuyas modalidades se detallan a continuación:

Radiografía: Es una técnica radiológica en la cual se expone al paciente a una fuente de radiación de alta energía, como los rayos X, y los rayos gamma de isótopos radioactivos. El cuerpo del paciente se interpone entre la fuente y el receptor de radiación, absorbiendo parte de la radiación; esto genera en el receptor una imagen con diferentes tonos en una escala de grises. Dentro de esta familia se pueden encontrar:

- Radiografía 2D, también llamada radiografía proyeccional;
- Tomografía computarizada (TC o TAC), que utiliza varios cortes de radiografías 2D para generar un volumen 3D;
- Densitometría ósea (Dual energy X-ray absorptiometry, DEXA), utilizada para pesquisar condiciones óseas patológicas, como osteopenia y osteoporosis;
- Fluoroscopia, utilizada para visualizar movimiento de un tejido o medio de contraste y para guiar procedimientos médicos, como una angioplastia.

Además, en algunas de estas variantes, se puede incorporar el uso de un medio de contraste para resaltar zonas de interés, como por ejemplo vasos sanguíneos de una estructura anatómica.

Resonancia magnética: Es una técnica de imágenes 3D que utiliza imanes capaces de generar un potente campo magnético que alinea los momentos magnéticos de los núcleos atómicos (del hidrógeno), para luego emitir pulsos de radiofrecuencia de diferentes frecuencias que son capturados por sensores ortogonales ubicados en los planos coronal, sagital y axial. Finalmente, esta información es combinada para obtener una posición espacial.

Medicina nuclear: Se utilizan ciertas propiedades de isótopos y las partículas energéticas emitidas de materiales radioactivos para diagnosticar o tratar algunas patologías. En cuanto a medicina nuclear diagnóstica, destacan:

Cintigrafía: También conocida como gammagrafía, utiliza radioisótopos unidos a fármacos dirigidos a un órgano o tejido específico, cuya radiación gamma es capturada por sensores denominados cámaras gamma que forman una imagen 2D. Sus aplicaciones van desde detección de coleditiasis y de fracturas óseas, hasta evaluación de la función tiroidea para detectar hipo o hipertiroidismo.

Tomografía por emisión de positrones (PET): Usa radioisótopos que emiten positrones, que al aniquilarse con los electrones del tejido circundante, emiten rayos gammas que son detectados por cámaras gamma. Esta información es sintetizada en un volumen 3D; se suele combinar con una tomografía computarizada para tener referencia anatómica. Sirve para observar procesos metabólicos, como, por ejemplo, tejido con alto consumo de glucosa, relacionado a metástasis de un cáncer.

Tomografía computarizada por emisión monofotónica (SPECT): Similar a una cintigrafía, los rayos gamma son medidos directamente desde el radioisótopo, pero para conformar una estructura 3D. Tiene menor resolución que una PET, pero es más económica. Sus aplicaciones son variadas, por ejemplo, para evaluar funcionamiento cerebral y detectar Alzheimer.

Ultrasonografía: Se utiliza para crear una imagen de estructuras internas del cuerpo humano, como músculos, vasos sanguíneos, tendones, órganos internos y articulaciones. Su principio de funcionamiento radica en utilizar pulsos de sonido en un rango de frecuencias por sobre los 20 kHz, que se reflejan de distinta forma en el tejido y se devuelven hacia el sensor. Se puede utilizar para crear imágenes 2D de un corte de un tejido o para representar tejido en movimiento (velocidad).

Endoscopia: Hace uso de una cámara para examinar el interior o una cavidad del cuerpo humano. Se suele utilizar para la evaluación del tracto gastrointestinal, respiratorio, urinario, etc.

Termografía: Se utilizan cámaras termográficas para detectar radiación en el rango infrarrojo del espectro electromagnético (9 -14 μm) y generar imágenes de esa radiación. Una de las aplicaciones médicas de la termografía es la detección de alergias o gripes.

6.4 Ingeniería de rehabilitación

La ingeniería de rehabilitación es la aplicación de las ciencias y principios de la ingeniería para diseñar e implementar soluciones tecnológicas para ayudar a las personas con discapacidad a la recuperación de las funciones físicas y cognitivas perdidas. De esta forma, se diseñan y construyen dispositivos destinados a mejorar la movilidad, percepciones, comunicación, cognición, etc., ayudando a las personas a tener una vida independiente. Cabe mencionar que la ingeniería de rehabilitación puede extender su alcance hacia el concepto de capacidades aumentadas (*human enhancement*).

Las principales áreas de desarrollo son neuromuscular, comunicación y lenguaje, audición, visión y cognición e incluye desde soluciones simples, que mejoran las tareas que los pacientes ejecutan en sus lugares de trabajo, hasta interfaces cerebro-computador destinadas a personas con discapacidad severa para que puedan operar un computador u otros dispositivos sin el uso tradicional del teclado, *mouse* o la voz. Dentro de esto, también se considera la recuperación de funciones completas o parte de ellas y las soluciones pueden abarcar todo el desarrollo como enfocarse en mejoras, optimizaciones, etc.

Las nuevas tecnologías y técnicas que ayudan a recuperar funciones físicas o cognitivas incluyen:

Robótica de rehabilitación: uso de robots como dispositivos de asistencia, ayudando en el entrenamiento de la movilidad para personas que sufren discapacidad motriz, como sucede en las secuelas de accidente vascular encefálico.

Rehabilitación virtual: utiliza la realidad virtual para rehabilitación física y cognitiva mediante la simulación de ejercicios, teniendo como principales ventajas el ser entretenidas y motivadoras, además de permitir la obtención de medidas objetivas como rangos de movimiento y de ser factible de realizar a través de internet (tele-rehabilitación).

Prótesis mejoradas: el objetivo es imitar de mejor manera el movimiento natural de las extremidades y la intención de movimiento del paciente.

Interfaz usuario-máquina en el uso de computadoras: interfaces más sofisticadas entre el usuario y varios dispositivos con el objetivo de permitir una mayor independencia e integración en la comunidad.

Desarrollo de otras tecnologías: para analizar el movimiento humano, entender la electrofisiología del músculo y la actividad cerebral, y monitorear de una manera más precisa las funciones humanas.

Los desarrollos que se encuentran disponibles se ejemplifican en el siguiente cuadro:

Tabla 5: Ejemplos de dispositivos de asistencia

Problema	Ejemplo	Objetivo
Discapacidades físicas que afectan el movimiento	Sillas de ruedas, patinetas y dispositivos prostéticos como extremidades artificiales	Proporcionar movilidad
Parálisis severa (impide movimiento de extremidades, respiración y habla)	Sistema controlado por los movimientos de la lengua que envían comandos a una computadora	Direccionar sillas de ruedas, operar computadoras y controlar el entorno de manera independiente
Discapacidad motriz severa	Interfaz cerebro-computadora que censa impulsos eléctricos del cerebro	Mover el cursor de la computadora o un brazo robótico que alcance y tome cosas
Debilidad o artritis en las manos	Implementos de cocina con agarraderas grandes y acolchonadas	Asistencia a personas con sus tareas cotidianas
Participación de personas con discapacidad	Pasa-páginas automáticos, porta libros y sujeta lápices adaptados	Permitir las actividades educativas en la escuela y en la casa
Alteración de memoria	Dispensadores de medicamentos con alarmas y otros recordatorios	Recordar tomar su medicina a tiempo y otras actividades de la vida diaria
Impedimentos sensoriales en el uso de la tecnología informática	Programas informáticos especialmente diseñados	Proporcionar reconocimiento de voz para asistir a las personas
Lesiones de médula espinal	Neuroestimulación	Recuperación del control voluntario de ciertos movimientos (ponerse de pie) e involuntarios de algunas funciones autónomas (vejiga)
Amputación de manos	Manos artificiales	Funcionar como manos naturales

Referencia: National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. "Ingeniería de Rehabilitación". Consultado el 04 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/ingenier%C3%ADa-de-rehabilitaci%C3%B3n>

7. INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial (IA) se conoce comúnmente como la capacidad de las máquinas para llevar a cabo tareas que requieren un comportamiento inteligente, emulando procesos generalmente asociados con la mente humana o de agentes inteligentes en general. Habitualmente se tiende a vincular este término con el concepto de *big data*, que según la definición de Gartner, de aproximadamente 2001 se refiere a los datos que contienen una mayor variedad y que se presentan en volúmenes crecientes y a una velocidad superior (“las tres V”), lo que no necesariamente se entrecruza con lo que entendemos por IA. A continuación, se revisarán algunas definiciones relacionadas, siempre en el contexto de aplicaciones en el ámbito de la salud.

7.1 Definiciones

Basándose principalmente en lo expuesto por Stuart Russell y Peter Norvig en “Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno”, las definiciones de IA se pueden organizar en cuatro categorías: sistemas que piensan como humanos, sistemas que piensan racionalmente, sistemas que actúan como humanos y sistemas que actúan racionalmente. Aquí están contenidas diferentes disciplinas que pueden confundirse entre sí, como la robótica, el aprendizaje automático (*machine learning*), las redes neuronales artificiales, el aprendizaje profundo (*deep learning*), entre otros. Es importante entender que muchos de estos conceptos son subconjuntos de otros, como se muestra en la figura a continuación.

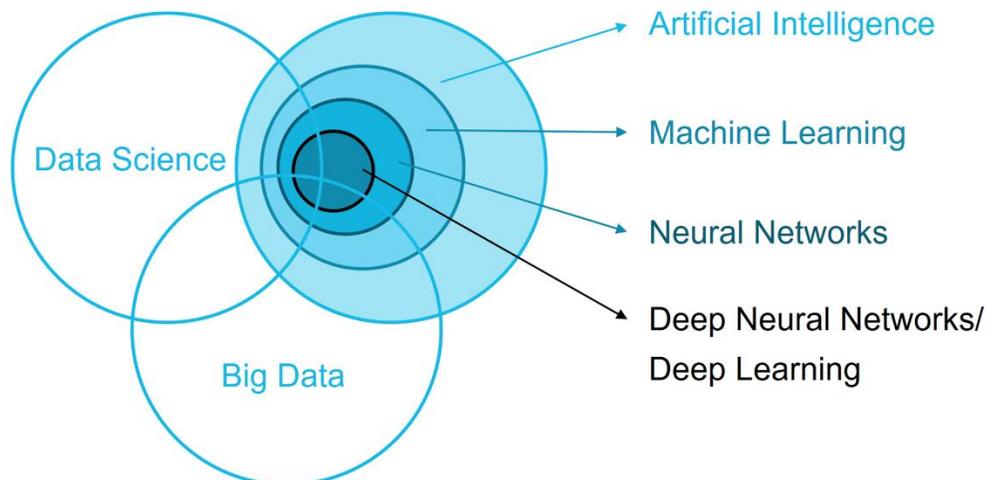


Gráfico 4: Diagrama de Venn Inteligencia Artificial
Fuente: VENN diagram of AI, Big Data and Data Science. Fraunhofer FOKUS

También es importante entender que no hay áreas o técnicas que sean intrínsecamente mejores que otras, sino que pueden ser más adecuadas o tener mejores resultados, dependiendo de la naturaleza de la entrada (usualmente datos) y del problema a resolver en salud.

7.2 Aprendizaje

En general, se relaciona el concepto de IA con sistemas basados en aprendizaje. Sin embargo, cabe considerar en la definición a sistemas que han sido entrenados en base a reglas. Ejemplos conocidos son sistemas como el que estuvo detrás del computador DeepBlue de IBM que venció al campeón de ajedrez Garry Kasparov en 1997, que usaba una combinación de reglas en base a posibilidades. Esto puede estar compuesto de conjuntos de reglas grandes y difíciles de procesar. En el caso de la salud y las ciencias de la vida, hay ciertos ejemplos que ayudan a ilustrar mejor el tipo de problema que se enfrenta en cada caso, como se ve en la figura a continuación.

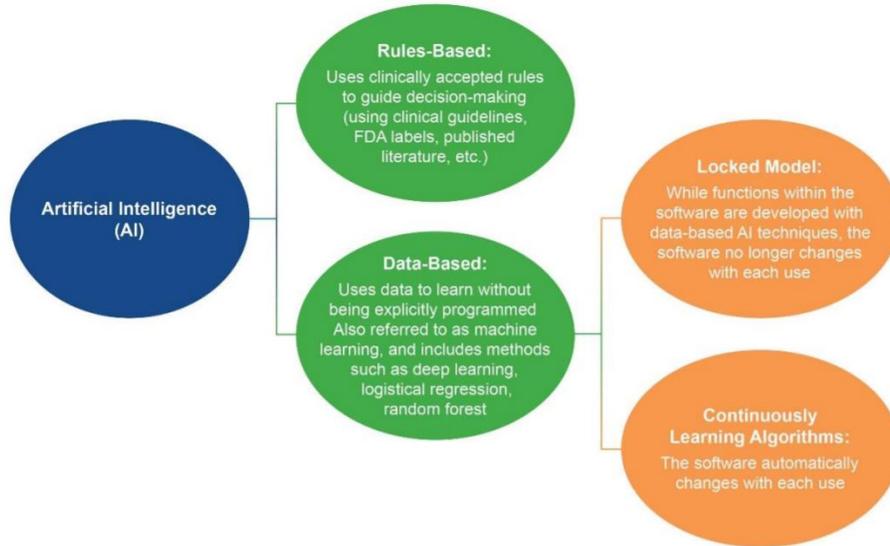


Figure 3. Types of AI Algorithms. AI includes both rules-based and data-based algorithms. Data-based algorithms can be locked or continuously learning. FDA, U.S. Food and Drug Administration.

Gráfico 5: Tipos de algoritmos de Inteligencia Artificial

Fuente: Daniel, G., Silcox, C., Sharma, I., & Wright, M. (2019). Current state and near-term priorities for AI-enabled diagnostic support software in health care. Duke. edu.

7.3 Aplicaciones en salud

Antes que los sistemas de IA puedan ser desplegados en aplicaciones de salud, éstos necesitan ser entrenados mediante datos que son generados en actividades clínicas, como tamizaje, diagnóstico, asignación de tratamiento, entre otros, para que puedan aprender de grupos con similitudes, asociación entre características y resultados de interés. Estos datos clínicos generalmente existen en forma de demografía, notas médicas, registros electrónicos de dispositivos médicos, exámenes físicos, laboratorios clínicos e imágenes.

Figure 3: Framework of all Artificial Intelligence Use Cases in Healthcare Categorized into Four Key Groupings

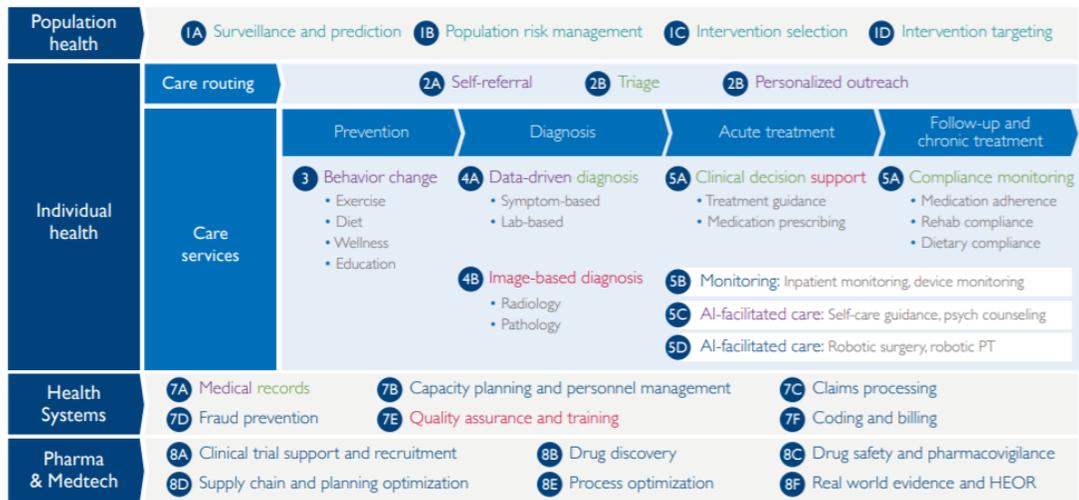


Figure 4: Artificial Intelligence Groupings of Use Cases

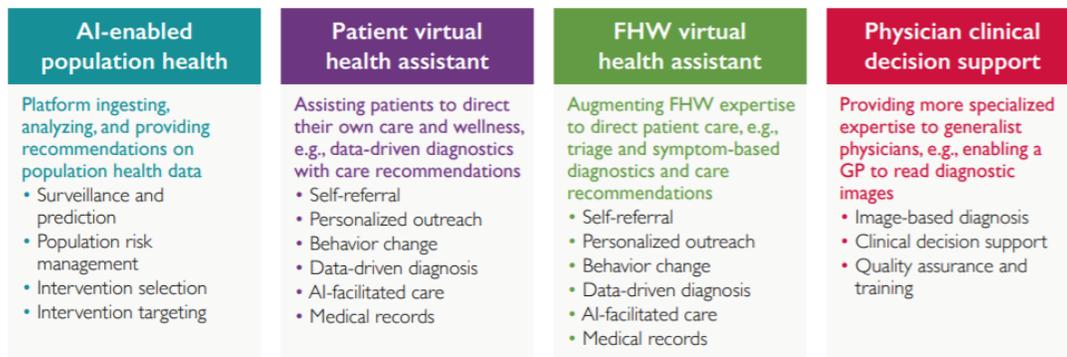


Gráfico 6: Inteligencia Artificial en Salud

Fuente: U.S. Agency for International Development. Artificial intelligence in global health: defining a collective path moving forward [Internet]. USAID; The Rockefeller Foundation; Bill & Melinda Gates Foundation; 2019. Available from: <https://www.usaid.gov/cii/ai-in-global-health>

Desde otro punto de vista, se puede decir que la IA en salud toca cuatro grandes dimensiones (y algunos respectivos ejemplos por cada una):

- Salud poblacional:
 - vigilancia
 - predicción
 - manejo de riesgo de la población
 - intervención focalizada.

- Salud individual:
 - ruta del cuidado/triage
 - apoyo del diagnóstico
 - apoyo a la decisión clínica
 - manejo del cuidado crónico.
- Sistemas de salud:
 - detección de fraudes
 - gestión de instalaciones/personal
 - aseguramiento de calidad
 - codificación y cobranza.
- Industria farmacéutica y tecnología médica:
 - apoyo a estudios clínicos
 - optimización de la cadena de suministro
 - vigilancia de los fármacos
 - evidencia del mundo real.

En cuanto al foco desde la dimensión de las enfermedades, la literatura se concentra principalmente en algunas de éstas: cáncer, enfermedad del sistema nervioso y enfermedad cardiovascular (ver figura a continuación). La concentración en torno a estas tres enfermedades no es completamente inesperada. Las tres son causas principales de muerte; por eso, diagnósticos tempranos son cruciales para prevenir el deterioro del estado de salud de los pacientes. Así, diagnósticos tempranos pueden ser potencialmente conseguidos por medio del mejoramiento de los procedimientos de análisis en imagenología, genética, electrofisiología o registros médicos electrónicos, lo que es la fortaleza de los sistemas de IA.

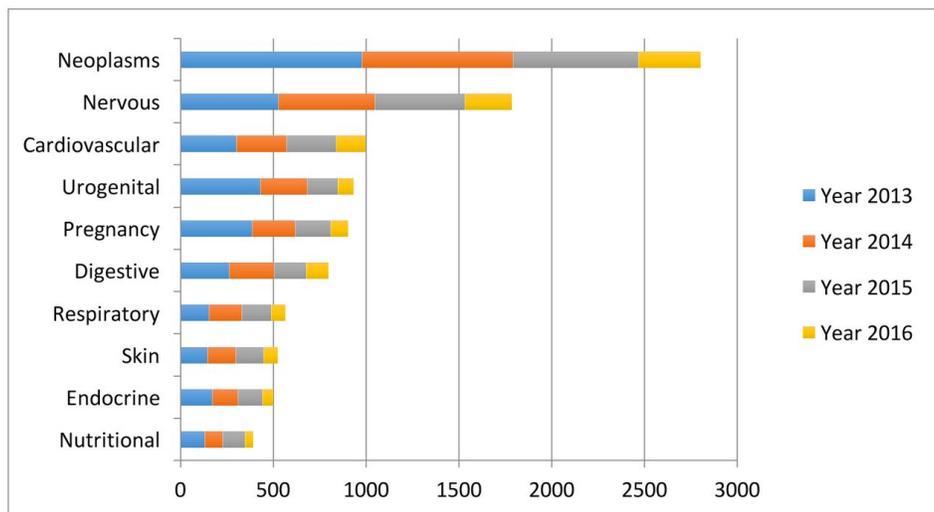


Gráfico 7: 10 mayores enfermedades asistidas con Inteligencia Artificial

Fuente: The leading 10 disease types considered in the artificial intelligence (AI) literature. The first vocabularies in the disease names are displayed. The comparison is obtained through searching the disease types in the AI literature on PubMed. Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., ... & Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and vascular neurology*, 2(4), 230-243.

7.4 Condiciones habilitantes

Basándose en el concepto de software como dispositivo médico (SaMD por su sigla en inglés), la tabla posterior muestra cómo se distribuyen los distintos tipos de dispositivos. Las cuatro categorías (I, II, III, IV) están basadas en los niveles de impacto en el paciente o en la salud pública, en la que la información precisa, provista por el SaMD para tratar o diagnosticar, impulsar o informar manejo clínico, es vital para evitar muerte, discapacidad de largo plazo u otros deterioros serios de salud, mitigando los costos en la salud pública.

De izquierda a derecha en la tabla se pasa de decisiones automatizadas a decisiones asistidas. La primera columna de la izquierda es para situaciones donde la información detonará una acción inmediata o de término cercano. La acción se puede tomar usando dispositivos conectados. La columna central se refiere a sistemas usados para guiar diagnósticos o tratamientos mediante información relevante, hacer triage o identificar señales tempranas. La columna de la derecha se refiere a casos donde la información no detonará una acción inmediata o de término cercano, como presentar una lista de opciones o agregar información relevante.

Tabla 6: IMDRF Software as a Medical Device (SaMD)

Estado de situación de salud o condición	Significancia de información provista por SaMD a la decisión de salud		
	Tratar o diagnosticar	Impulsar manejo clínico	Informar manejo clínico
Crítico	IV	III	II
Serio	III	II	I
No serio	II	I	I

Referencia: International Medical Device Regulators Forum “Software as a Medical Device” Working Group (2014: Possible Framework for Risk Categorization and Corresponding Considerations.

A pesar de que las tecnologías basadas en IA están atrayendo mucha atención en la investigación médica, la implementación en el mundo real aún enfrenta obstáculos. La primera barrera tiene que ver con las regulaciones. Actualmente hay falta de estándares para evaluar la seguridad y eficacia de los sistemas de IA. Como primer enfoque, la U.S. Food and Drug Administration (FDA) ha elaborado una guía donde aborda estos sistemas como productos de bienestar general (mientras presenten bajo riesgo para los usuarios), explicables mediante evidencia fuera del laboratorio para evaluar su rendimiento, o bien clarificando las reglas de diseño adaptativo de ensayos clínicos, siendo esta última directriz la que sería ampliamente utilizada en la evaluación de características de operación de sistemas de IA.

La segunda barrera es el intercambio de datos, asociados al continuo entrenamiento de sistemas en base a información histórica, lo que se contrasta con la falta de incentivos para compartirla, por parte de todos los actores de la cadena. Esto está cambiando, principalmente debido a la evolución

del modelo de atención y pagos en EE.UU. y China. Sin embargo, a la falta de incentivos se suma la viabilidad técnica asociada a la seguridad de la información y aspectos éticos.

Abordando el tema ético, la IA ética es conceptualmente aquella desarrollada para ser socialmente útil y también socialmente responsable. Está en el interés de quienes desarrollan IA en salud o los que planean utilizarla, considerar primero las consecuencias de su uso. Algunos puntos que considerar son: un estándar de evidencia más alto, consentimiento informado, errores debido al sesgo en los datos, transparencia en la complejidad y consejos de ética de IA.

En cuanto a la responsabilidad legal, también hay desafíos. La complejidad de los sistemas de IA en salud los hace enfrentar ciertos aspectos ⁽¹¹⁾:

- los fabricantes o médicos que trabajan con los sistemas pueden no entender todas las razones que conllevan a un resultado diagnóstico o acción sugerida,
- Como resultado de la cooperación de personas y múltiples sistemas de IA, las fronteras de responsabilidad se vuelven difusas,
- el constante progreso de los sistemas de IA hace difícil determinar el estado del arte al momento del lanzamiento de un producto y por lo tanto definir algún defecto de este,
- desde el punto de vista de la parte afectada, esto también crea un problema para mostrar la evidencia necesaria.

7.5 Oportunidades para el escenario chileno

Considerando las definiciones de inteligencia artificial aquí adoptadas y sus aplicaciones en salud, se puede considerar este grupo de conceptos en el escenario chileno. En este sentido, es importante hacer el análisis desde el punto de vista de la salud (su contexto, limitaciones y, sobre todo, necesidades) y no desde la tecnología. Por lo mismo, se hace aquí un repaso de lo enunciado en capítulos anteriores.

Además de considerar la lógica de ir desde la salud hacia la tecnología (la ingeniería, o, específicamente, la inteligencia artificial), es muy importante percibir el desafío como la construcción de la salud y no sólo como la atención de la enfermedad. Las herramientas y el panorama descritos permiten abordar esto de mejor manera, dado que todas las herramientas basadas en datos permiten apuntar a construir modelos de aprendizaje, pronóstico, enfoque de intervenciones y predicción, para actuar antes de que situaciones de salud pública escalen en complejidad y costos asociados que disminuyen las posibilidades de recuperación e incluso sobrevida.

Específicamente, en cuanto a las políticas públicas, el escenario de generación de grandes volúmenes de datos estructurados y el avance y facilitación de uso de herramientas de inteligencia artificial abren una buena oportunidad. A pesar de referirnos en general a grandes poblaciones, justamente se presenta la alternativa de transitar hacia un modelo de salud mucho más personalizada. Esto se debe a la capacidad de cómputo de grandes volúmenes de datos orientada hacia, por ejemplo, modelos matemáticos de segmentación de pacientes para seguimiento,

¹¹ AI in Life Sciences, CMS, 2019

diagnóstico, tratamiento y control. Aquí son útiles incluso modelos de aprendizaje no supervisado, donde, a diferencia de los sistemas más corrientes de entrenamiento basado en alcanzar objetivos específicos (*targets*), se busca encontrar correlaciones multidimensionales (como indicadores de salud o factores de riesgo) para generar distintos grupos de pacientes a los que abordar con distintas estrategias.

Para lo anterior y lo siguiente, un dato auspicioso es el del mayor nivel de instrucción de la población chilena. Especialmente ante el envejecimiento de la población (y, por consiguiente, una menor proporción de personas nativas digitales), una mejor curva de aprendizaje permite una adopción y comprensión más acelerada del funcionamiento básico e implicancias de la inclusión de herramientas basadas en inteligencia artificial en el camino que debe recorrer una persona en su condición de paciente. Esto incide tanto en el individuo mismo como en la persona significativa, entendida esta última como la persona de confianza que colabora con el paciente en distintas etapas del proceso de cuidado.

La realidad epidemiológica también es algo a tener en consideración. Como se ha dicho en el capítulo II, la alta prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles exige repensar el modelo de atención. Pero desde el punto de vista de la inteligencia artificial, el paso es muy directo hacia la detección temprana de nuevas condiciones adicionales para pacientes crónicos, ya sea enfermedades independientes o derivadas de las existentes. Aquí es donde se aplican, de muy buena manera, los sistemas de asistencia diagnóstica, tamizaje automatizado, priorización, triage, entre otros, basados en aprendizaje automático.

Pero, además de las enfermedades crónicas no transmisibles y su control, brotes de otro tipo de patologías pueden agravar más los desajustes que puedan existir en el modelo de atención. De hecho, la tasa de pacientes con enfermedades crónicas sumada al envejecimiento de la población toma aún más importancia dada la condición de riesgo ante dichos brotes, como los de enfermedades contagiosas. En conjunto, nuevamente se hace evidente la falta de especialistas médicos. En este escenario se debe hacer presente la inteligencia artificial como complemento y factor multiplicador, apoyada en un plan base de salud digital, conectividad y registro clínico.

La disponibilidad tecnológica en altos grados de sofisticación, sin embargo, debe además ponerse al servicio de un modelo de atención que fortalezca la atención primaria. Esto se debe tomar como una oportunidad para aprovechar estas nuevas herramientas y, por ejemplo, asistir a médicos de atención primaria o médicos generales en la separación de los casos que no requieren niveles más complejos de atención, mediante sistemas diagnósticos que empaquetan el conocimiento de millones de transacciones de especialistas y subespecialistas en áreas, por ejemplo, como la radiología.

Más allá de lo mencionado respecto a las oportunidades de mejorar en el área de diagnóstico, es importante complementar con las expectativas del potencial de la telemedicina. Si bien ésta aún tiene un camino por recorrer para llegar a un nivel de adopción en el que siga siendo un aporte, sigue siendo un desafío completar una mirada basada en exámenes y mediciones complementarias (de diferente complejidad) para una toma de decisiones integral y correcta derivación a especialidad. En este aspecto es donde se puede apuntar a aprovechar una estrategia de salud digital no solo para la telemedicina de consulta médica, sino para la incorporación de inteligencia artificial como pilar fundamental en la construcción de un modelo de atención en red y de potenciamiento de la capacidad de especialistas para una toma de decisiones eficiente desde los

primeros niveles de atención (incluyendo cuidado y atención domiciliaria) con la automatización de procesos administrativos y de gestión, como también de decisiones diagnósticas, en los matices ya expuestos en párrafos anteriores.

De manera similar, la dimensión del tratamiento también está ligada a las oportunidades que surgen desde el uso de la tecnología. Si bien no hemos abordado la dimensión robótica de la inteligencia artificial, las decisiones basadas en datos sí tienen algo que aportar. Principalmente asociado al diagnóstico oportuno y preciso, el tratamiento puede mejorar sus indicadores, vinculados a esas etapas preliminares. Además, en relación con la salud de poblaciones y segmentación de pacientes ya comentada, hay oportunidades para mejor tratamiento (y seguimiento, que incluso puede llevar a evitar tratamientos y utilización de recursos hospitalarios asociados), especialmente en cuanto al grado de enfoque y personalización. Cabe mencionar, en todo caso, que desde el punto de vista de la salud pública se debe evaluar la rentabilidad de la inversión en prevención en contraste (y su ahorro futuro generado) con el gasto en tratamiento.

Con todo, hay una buena oportunidad para la ingeniería chilena debido a que las oportunidades de mejora en la salud son variadas. Muchas de las alternativas de solución desde el punto de vista de la inteligencia artificial aquí planteadas ya están en algún grado de avance, especialmente en el plano internacional. Sin embargo, un factor importante a considerar es justamente cómo leer de buena manera las particularidades locales para tender puentes entre éstas y la tecnología existente o ya en aplicación en países mejor preparados. Esto debe considerar además las condiciones habilitantes, como los niveles de digitalización de los registros e imagenología, interoperabilidad de sistemas, conectividad, regulación, entre otros, pero también el importante factor de la gestión del cambio más allá de la simple digitalización de procesos existentes.

8. FORMACIÓN DE PROFESIONALES

8.1 Características generales

La ingeniería biomédica es una disciplina que tiene actualmente un fuerte desarrollo, tanto desde el punto de vista académico como profesional. En USA, existen 19.800 ingenieros biomédicos y la demanda por ellos está creciendo a una tasa de anual de 4%¹². En Chile, el desarrollo de la Ingeniería Biomédica ha sido más lento.

En este capítulo se presenta una relación entre las carreras de pregrado y postgrado ofrecidas en Chile y en el extranjero.

Situación internacional

La ingeniería biomédica es una especialidad que tiene una gran tradición en Estados Unidos (EEUU) y Europa, países en los que es ampliamente reconocida. Solamente en EEUU, existen 95 carreras de pregrado, de cuatro años de duración, acreditadas en ABET¹³, que otorgan el grado de Bachiller en Ciencias (BS) de Ingeniería Biomédica, además de diversos programas de postgrado.

La formación de ingenieros biomédicos se ha desarrollado en forma paralela a las necesidades de los proveedores de equipos médicos de contar con profesionales preparados para diseñar y construir estos equipos.

Formación de pregrado

En general, la formación de Ingenieros Biomédicos, al igual que lo que ocurre con otras ramas de la ingeniería, es interdisciplinaria y en su malla curricular se consideran ramos de ciencias básicas: matemáticas, física, química y biología y ciencias aplicadas como biomateriales y biomecánica, que se complementan con materias propias de las ciencias médicas como: anatomía, fisiología, biología celular y con actividades prácticas como trabajo de laboratorio, sesiones de simulación por computadora o visitas a hospitales y centros de atención.

Formación de postgrado

Además de la formación en pregrado, otra opción de formación son los programas de postgrado. Existe un importante número de universidades que entregan una formación en esta área. En la siguiente tabla se muestra un ranking de las 10 universidades mejor catalogadas y sus líneas principales de investigación.

¹² <https://www.bls.gov/ooh/architecture-and-engineering/biomedical-engineers.htm>

¹³ <https://www.abet.org/> Organización sin fines de lucro, con certificación ISO 9001, que acredita programas universitarios y universitarios en tecnología aplicada y de ciencias naturales, informática, ingeniería e ingeniería.

Tabla 7: Áreas de investigación de universidad extranjeras

Nro.	Universidad	País	Áreas de investigación
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	EE. UU.	Ingeniería celular y de tejidos, biomateriales para medicina regenerativa y administración de medicamentos. Otras áreas de estudio incluyen la mecano biología, que es la regulación biofísica de la señalización celular y la función tisular
2	ETH Zurich	Suiza	Bioelectrónica, bioimagen, biomecánica, física médica y bioingeniería molecular
3	Imperial College, London	Reino Unido	Biomecánica y mecano biología, biomateriales e ingeniería de tejidos, física médica e imágenes, neurotecnología.
4	Tampere University of Technology	Finlandia	Tecnología de la salud y la informática, biomateriales e ingeniería de tejidos, micro y nano dispositivos biomédicos.
5	Johns Hopkins University	EE. UU.	Innovación y diseño de bioingeniería, ciencia de datos biomédica, imágenes biomédicas e instrumentación, medicina computacional, neuroingeniería y tecnología
6	University of Twente	Holanda	Robots de rehabilitación, imágenes médicas, órganos artificiales y prótesis
7	Georgia Institute of Technology	EE. UU.	Tecnología y dispositivos de ingeniería biomédica
8	Newcastle University	Reino Unido	Nanomateriales, ingeniería de tejidos, diseño de tecnología de asistencia.
9	University of Warwick	Reino Unido	Imagen biomédica, modelado compartimental en fisiología y medicina, biomecánica, propiedades y diseño de materiales empleados en aplicaciones, ingeniería de tejidos y tecnologías sanitarias.

Referencia: Elaboración propia

8.2 Situación en Chile

En Chile, la formación de ingenieros biomédicos tuvo un importante desarrollo en las décadas del 60 y 70.

En la década del 60, el Fisiólogo B. Günther (MD) inició el desarrollo de esta disciplina liderando temas de memoria en Ingeniería.

En la década del 70, se distinguen diferentes esfuerzos personales:

- En el Departamento de Fisiología de la Sede Valparaíso de la Universidad de Chile se desarrollaron trabajos de titulación para optar al título de Ing. Civil Electrónico de la Universidad Federico Santa María guiados por Profesores de esta universidad y co-guiados por docentes de fisiología de la Universidad de Valparaíso.
- En 1972, se diseñó y construyó el primer Riñón Artificial Chileno, desarrollado por los ingenieros y profesionales G. Blanchard, H. Aguirre, J. Kaplán y M. Espina.
- en 1972, en el Departamento de electrónica de la Universidad del Norte, G. Avendaño diseñó y construyó, el primer marcapasos cardíaco chileno, con la participación de los Ingenieros y profesionales E. Rasmusen, M. Schugurenski e I. Cantillano.

Existen dos instancias para formar profesionales en esta área, a saber, programas de pregrado y programas de postgrado.

Programas de Pregrado

Existen cuatro Universidades que cuentan actualmente con programas de formación de pregrado en Ingeniería Biomédica: Universidad de Valparaíso, Universidad de Concepción, Universidad de Santiago y Universidad Católica, los que se resumen a continuación.

Universidad de Valparaíso

Esta Universidad ofrece, desde el año 2000, la carrera de Ingeniería Civil Biomédica, carrera a las que ingresan en promedio 60 alumnos cada año. Esta carrera tiene una duración de 12 semestres y los estudiantes egresan con el grado académico de Licenciado en Ciencias de Ingeniería Biomédica y con el título profesional de Ingeniero Civil Biomédico.

El Ingeniero Civil Biomédico formado por esta Universidad, como se define en el perfil de egreso, es un *“profesional que integra en su quehacer conocimientos de las ciencias, la ingeniería y la salud, en la búsqueda de proveer soluciones que impacten positivamente la salud de las personas”*.

La formación del Ingeniero Civil Biomédico está orientada a que éste se desempeñe en las áreas de equipos y dispositivos médicos, tecnologías y sistemas de información en salud, proyectos para organizaciones de salud, administración y gestión de organizaciones proveedoras de servicios de salud, e investigación, desarrollo e innovación.

Universidad de Concepción: Ingeniería Civil Biomédica

Esta Universidad ofrece, desde el año 2005, la carrera de Ingeniería Civil Biomédica, carrera a las que ingresan en promedio 60 alumnos cada año. Esta carrera tiene una duración de 12 semestres y los estudiantes egresan con el grado académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería con el título profesional de Ingeniero Civil Biomédico.

Esta carrera, según se indica en el plan de carrera está destinada a *“formar profesionales con conocimientos de avanzada en equipamiento médico, en bioingeniería clínica y en desarrollo e informática médica, y con capacidades para ejecutar proyectos de ingeniería aplicados a la medicina y la biología”*.

El Ingeniero Civil Biomédico formado por esta Universidad, es un profesional *“capaz de integrar conocimientos de ingeniería y medicina para desenvolverse en el campo de la medicina de alta tecnología, lo que comprende sistemas de diagnóstico, cirugía, dispositivos de asistencia fisiológica, tratamientos y equipamiento eléctrico y electrónico biomédico”*.

Universidad de Santiago de Chile

Esta Universidad ofrece, a partir del año 2020, la carrera de Ingeniería Civil Biomédica, carrera que tiene 50 vacantes, 11 semestres de duración y de la que sus estudiantes egresarán con el grado académico de Licenciado en Ciencias de Ingeniería Biomédica y con el título profesional de Ingeniero Civil Biomédico.

El modelo curricular propuesto contempla una línea formativa común en las ingenierías civiles, que *“le permitirán al alumno desarrollar habilidades de innovación y emprendimiento de base científico-tecnológica para contribuir a aumentar la productividad nacional y el bienestar social con una perspectiva global”*.

El Ingeniero Civil Biomédico que formará esta Universidad será capaz de *“aplicar conocimientos de ingeniería y ciencias exactas, biológicas y económicas para el entendimiento, diseño, modificación y control de sistemas biológicos y la manufactura de productos y procedimientos para asistir al diagnóstico y tratamiento de pacientes.”*

Pontificia Universidad Católica de Chile

Esta universidad ofrece un programa de pregrado en Ingeniería Biomédica (*major* y *minor*) que busca desarrollar la capacidad de aplicar soluciones innovadoras a los problemas de la salud humana, con un enfoque interdisciplinario y permite a sus alumnos *“articular sus conocimientos interdisciplinarios para desempeñarse y desarrollar soluciones innovadoras en lo académico, las redes de salud públicas y privadas, la industria biomédica y el emprendimiento”*.

Los alumnos de Ingeniería Biomédica ingresan a un plan común de Ingeniería civil de dos años, al cabo de los cuales los alumnos pueden optar por distintos *majors*, entre ellos, el de Ingeniería Biomédica. Parte de los estudiantes que sigue el *major* de ingeniería biomédica opta por el *minor* de premedicina, con el cual pueden acceder a completar el título profesional de Médico Cirujano. Luego de completar el *major* y *minor*, los estudiantes se gradúan como licenciados en ciencias de la ingeniería y pueden optar al título profesional de Ingeniero Civil (con distintas especialidades) o Médico Cirujano (en el caso del track de biomedicina), realizar directamente un postgrado en la misma Universidad u otra, o salir al mundo laboral directamente. Las líneas de investigación de este programa de Ingeniería Biomédica incluyen imágenes biomédicas, biopelículas, biomateriales e ingeniería de tejidos, ingeniería de proteínas, fisiología cuantitativa, biofísica y biología computacional, interfaz cerebro computador y biología sintética.

Programas de Postgrado

Además de los programas indicados anteriormente, existen tres Universidades que tienen programas de postgrado para formar Ingenieros en el área biomédica, a saber, la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile, los que se indican a continuación.

Universidad de Valparaíso

Esta Universidad ofrece un Programa de Magister que busca que los licenciados en ciencias de la ingeniería biomédica obtengan los conocimientos teóricos y prácticos que les permitan desarrollar tanto investigación como elaborar proyectos científicos en forma multidisciplinaria, en su entorno laboral.

Las líneas de investigación de este programa incluyen: informática médica, bioinstrumentación, ingeniería clínica y gestión de organizaciones y tecnologías en salud.

Universidad de Chile

Esta universidad ofrece, a quienes estén en posesión de un grado equivalente a Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería Eléctrica, la posibilidad de seguir el programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Biomédica, programa orientado a formar profesionales y académicos que satisfagan apropiadamente la demanda de ingeniería requerida por la medicina y biología, tanto en el ejercicio profesional como en la investigación.

Pontificia Universidad Católica de Chile

La Pontificia Universidad Católica de Chile ofrece desde el año 2019 cuenta con el Doctorado y Magíster en Ingeniería Biológica y Médica (<https://ingenieriabiologicaymedica.uc.cl/es/programas-de-estudio/postgrado/doctorado/plan-de-estudios>).

Las líneas de investigación de este programa de ingeniería biomédica incluyen imágenes biomédicas, biopelículas, biomateriales e ingeniería de tejidos, ingeniería de proteínas, fisiología cuantitativa, biofísica y biología computacional, interfaz cerebro computador y biología sintética.

8.3 Campo ocupacional

La Ingeniería Biomédica, como se indicó anteriormente, comprende un gran número de actividades en las que confluyen las disciplinas de Ingeniería, Biología y Medicina. Esta especialidad “combina los métodos analíticos y experimentales de la ingeniería con la biología y las ciencias médicas para lograr una mejor comprensión de los fenómenos biológicos y desarrollar nuevas técnicas y equipos¹⁴”.

La formación tradicional de los ingenieros, en la que destacan su aproximación cuantitativa y analítica a los diferentes problemas que se presentan, su competencia tradicional en el ámbito de procesamiento y control de la información, energía o utilización de nuevos materiales junto con su habilidad para diseñar y analizar diferentes sistemas, constituyen herramientas poderosas para ser integradas a la biología y la medicina.

El Ingeniero Civil Biomédico es por lo tanto un profesional que es capaz de integrar conocimientos provenientes de la ingeniería y de la medicina y de desenvolverse en diferentes ámbitos. El campo ocupacional del Ingeniero Biomédico es muy amplio, pudiendo trabajar en:

- Empresas productivas o de servicios con alto grado de instrumentación y automatización
- Ministerios, Servicios, Instituciones y organizaciones públicas de Salud
- Empresas de ingeniería y en empresas de investigación y desarrollo
- El desarrollo de nuevas técnicas, equipos e instrumentos de diagnóstico y de terapia para empresas del área médica.
- Hospitales, Clínicas y centros de Salud públicos y privados, entregando el apoyo tecnológico requerido por la medicina.
- Empresas no biológicas, en áreas relacionadas con robótica y automatización.

¹⁴ Página web U. de Valparaíso

Además, puede trabajar como profesional independiente:

- Elaborando proyectos de diseño, implementación, mantención o reparación de equipos electrónicos e instrumentación.
- Prestando servicios de asesoría para el mejoramiento de la gestión tecnológica y el mantenimiento de los establecimientos de salud.
- Entregando servicios de calibración, control de calidad y certificación de equipos e instalaciones médicas.
- Otorgando servicios de Asesoría para la formulación de proyectos de infraestructura destinada a establecimientos de salud.
- Asesorando a proveedores de Equipos e insumos Médicos.

9. SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Síntesis

1. La ingeniería tiene un rol creciente en las ciencias biomédicas, es decir, aquella parte de las Ciencias de la Vida que se ocupa de la salud humana.
2. La ingeniería biomédica aplica principios de ingeniería y conceptos de diseño a la medicina y a la biología, con fines sanitarios, para avanzar en el tratamiento de la salud, incluyendo el diagnóstico, tratamiento y rehabilitación. El rango de aplicación incluye ingeniería clínica, Informática médica, Ingeniería biomecánica, Instrumentación biomédica, Ingeniería de rehabilitación e ingeniería de tejidos y biomateriales.
3. El campo envuelve el diseño de dispositivos médicos, equipos de diagnóstico, sistemas expertos y de inteligencia artificial para el diagnóstico, materiales biocompatibles, nuevas tecnologías de imágenes médicas, dispositivos portátiles y rápidos de diagnóstico de enfermedades, prótesis, de biofarmacéuticos y de diseño de órganos y es un campo de rápido crecimiento en el que los ingenieros juegan importantes y diferentes roles.
4. En atención a lo anterior, este documento está concebido tanto para dar a conocer la opinión del Instituto sobre este campo de la ingeniería a aquellos círculos que se interesan en el tema, como para informar y formar opinión en el propio Instituto.
5. Los grandes cambios en los temas de salud que están ocurriendo tienen su origen en la notable disminución de las Enfermedades Transmisibles, en el envejecimiento de la población y en el peso progresivo en el sistema de salud de las Enfermedades Crónicas no Transmisibles (ECNT).
6. Este juicio es más matizado con relación a las enfermedades virales, como lo prueba la pandemia que en este momento sufrimos.
7. Las dos grandes transformaciones del paso a las no transmisibles serán el cambio del lugar de tratamiento, que pasará del hospital al hogar, y el cambio del tipo de cuidado, que pasará desde diagnosticar y tratar a prevenir y gestionar. El sistema de salud requerirá menos camas y más desarrollo de servicios que proporcionen mejor acceso y calidad del cuidado, a un menor costo.
8. Chile tiene un sistema de salud que le ha permitido alcanzar indicadores de salud muy positivos, acompañado por haber completado la transición epidemiológica, pasando de desde un perfil en el cual dominaban las enfermedades transmisibles, a uno donde dominan las enfermedades crónicas no transmisibles. Esta transición epidemiológica nos obliga a enfrentar con otras visiones la patología dominante en la sociedad, es decir considerando que las ECNT, en su larga evolución, producen el deterioro que llevan a una discapacidad o a la muerte prematura.
9. La gran paradoja del sistema de salud chileno es que con buenos resultados sanitarios existe una gran insatisfacción de la población respecto del sistema de salud. Una de las razones es la inadaptación del sistema de salud al nuevo perfil epidemiológico de la población. Por ejemplo, si un paciente sufre alguna dolencia que deriva de una ECNT y busca atención, usualmente concurre a un servicio de urgencia, el que no está adaptado para atenderlo, pero al que recarga. El paciente, en estos casos, percibe que ha sido mal atendido, lo que es real, y se frustra.
10. El acento en el tema de la salud pasará a la prevención y el acceso, usando medios digitales, reduciendo así la necesidad de trabajo especializado, aumentando la eficiencia y disminuyendo los costos. Los servicios digitales permitirán a los ciudadanos tomar un papel activo en la gestión de su propio bienestar y atención médica, viviendo de manera más saludable y ayudando así a

prevenir enfermedades crónicas. Para que estos servicios digitales puedan ser utilizados en toda su capacidad se requiere una coordinación con la legislación que protege los datos sensibles. A estos servicios se agregarán sensores y dispositivos inteligentes para monitorear remotamente la salud del paciente, identificando signos tempranos de degradación y previniendo eventos adversos.

11. El gran cambio que se inicia en la forma de enfrentar la salud de la población es "transitar de una visión de la atención de la enfermedad a la construcción de la salud", sin perjuicio de las políticas de higiene pública, como el acceso al agua potable, tratamiento de las excretas, higiene de alimentos, mejoramiento de la calidad del aire urbano, entre otras.
12. En el área de la ingeniería biomédica existe confusión entre los campos que la componen y sus contenidos, por lo que el informe presenta una propuesta de ordenamiento de los términos utilizados y sus alcances. Las ramas que se pueden distinguir en la ingeniería biomédica son:
 - Ingeniería Clínica, que apoya y promueve el cuidado del paciente mediante la aplicación de la ingeniería y los conocimientos de gestión a la tecnología sanitaria;
 - Informática Médica, que aplica las TIC al área de la salud, mediante el uso del software médico, con el objetivo principal de prestar servicio a los profesionales de la salud para mejorar la calidad de la atención sanitaria;
 - Ingeniería Biomecánica, aplicada al estudio del comportamiento de los sistemas biológicos;
 - Ingeniería de Rehabilitación, que es la aplicación de ciencias e ingeniería para diseñar, desarrollar, adaptar, probar, evaluar, aplicar y distribuir soluciones tecnológicas para personas con discapacidad;
 - Instrumentación Biomédica que aplica las técnicas de la ingeniería y la medicina para diseñar y fabricar equipos utilizados en las diferentes especialidades médicas;
 - Ingeniería de Tejidos y Biomateriales, que utiliza una combinación de células, ingeniería y métodos de materiales y factores bioquímicos y fisicoquímicos adecuados para mejorar o reemplazar los tejidos biológicos;
13. La Ingeniería Biomecánica utiliza la mecánica y otras tecnologías al estudio del comportamiento de los sistemas biológicos, en particular del cuerpo humano, y a resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido. En ella se reconocen cuatro áreas:

La Biomecánica médica o clínica estudia los sistemas biológicos, evaluando las patologías que aquejan al cuerpo humano para generar soluciones capaces de valorarlas, repararlas o paliarlas. Estudia el flujo sanguíneo y el comportamiento mecánico de los vasos, ofrece asistencia por computador al diagnóstico y a la terapia cardíaca, ha desarrollado técnicas de análisis del movimiento, músculo-esquelético, de tejidos, cardíaco, vascular y respiratorio; desarrollo de biomateriales. Ejemplo de lo anterior es el Instituto de Ingeniería Biológica y Médica de la Pontificia Universidad Católica,

La Biomecánica ocupacional (Fisioterapéutica) analiza la relación mecánica que el cuerpo sostiene con los elementos con los que interactúa en los diversos ámbitos, para adaptarlos a sus necesidades y capacidades, así como para la búsqueda de soluciones,

La biomecánica deportiva es la aplicación de la mecánica, como parte de la física, en la investigación y desarrollo de los movimientos del atleta en la realización de los ejercicios físicos,

Biomecánica forense aplica sus conceptos a determinar mecanismos causales que aclaren el modo en que se produjeron las lesiones,

14. La biomecánica computacional es una línea de investigación dentro de la biomecánica encargada de usar elementos de la informática para la resolución de diferentes problemas.
15. La instrumentación biomédica o Bioinstrumentación es un área de la ingeniería biomédica que se enfoca en dispositivos para medir, evaluar y tratar sistemas biológicos. Requieren sofisticados equipos y técnicas de adquisición de datos, para preservar fidedignamente la información y estructura de la señal de interés.
16. Los sistemas de Bioinstrumentación diagnósticos son utilizados rutinariamente en la práctica clínica para medir un amplio rango de variables fisiológicas que proveen importante información diagnóstica en hospitales y laboratorios clínicos para la medición de variables fisiológicas críticas de manera invasiva y no invasiva, in-vivo e in-vitro.
17. La imagenología médica contempla diferentes modalidades y procesos para visualizar el cuerpo humano con propósitos diagnósticos y terapéuticos. Una lista de los principales se encuentra en el informe.
18. Los dispositivos terapéuticos destinados a tratamientos de los pacientes forman un conjunto de dispositivos electromecánicos, que están detallados en el informe
19. Los sensores biomédicos físicos, químicos, eléctricos y ópticos están señalados en el informe y son de especial importancia para el desarrollo de medición y diagnóstico a distancia
20. La Ingeniería de rehabilitación también está detallada en el informe y ha tenido un particular desarrollo en los departamentos de mecánica de las escuelas de ingeniería.
21. Las definiciones de IA se pueden organizar en 4 categorías: sistemas que piensan como humanos, que piensan racionalmente, que actúan como humanos y que actúan racionalmente.
22. En Europa y EEUU La formación de ingenieros biomédicos se ha desarrollado en forma paralela a las necesidades de los proveedores de equipos médicos de contar con profesionales preparados para diseñar y construir estos equipos. Algunas de las áreas en las que se forman estos profesionales son: ingeniería celular, ingeniería de tejidos, biomateriales, bioelectrónica, bioimagen, biomecánica, bioingeniería molecular, mecanobiología, neurotecnología, nanodispositivos biomédicos, ciencia de datos biomédica, medicina computacional, neuroingeniería, robótica, órganos artificiales, y nanomaterials.
23. En Chile existen cuatro Universidades que cuentan actualmente con programas de formación de pregrado en Ingeniería Biomédica: Universidad de Valparaíso, Universidad de Concepción, Universidad de Santiago y Universidad Católica. Tres de ellas que tienen programas de postgrado para formar Ingenieros en el área biomédica, a saber, la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile.
24. La formación del Ingeniero Civil Biomédico está orientada a que éste se desempeñe entregando soporte técnico a equipos y dispositivos médicos, ejecutando proyectos de ingeniería aplicados a la medicina y la biología, desarrollando proyectos en sistemas de información para la salud en salud y en la administración y gestión de organizaciones relacionadas con la salud.

9.2 Conclusiones

1. El mejor conocimiento de los mecanismos de génesis de la enfermedad (genética, biología molecular) permite una intervención sanitaria óptima en oportunidad y eficacia.
2. Los indicadores bioquímicos precoces de deterioro permitirán establecer grupos de riesgo que sean objeto de programas preventivos ad-hoc.
3. La construcción de la salud es el objetivo principal de los sistemas de salud en el siglo XXI. La promoción de la salud y la prevención de las enfermedades pueden ser más específicas y eficaces y tendrán un gran impacto en la esperanza de vida y la calidad de vida de las personas.
4. Uno de los mayores impactos de los avances tecnológicos se dará en el terreno de la inteligencia artificial que permitirá diagnósticos más certeros, como apoyo al trabajo de los médicos y otros profesionales de la salud, a nivel de la atención primaria de salud (APS), además de la miniaturización de los equipos, facilidad de manejo y exactitud de los exámenes de laboratorio, que podrán ser usados en los consultorios periféricos con obtención inmediata de los resultados y el autocontrol de algunas dolencias ya que los propios pacientes tendrán la posibilidad de monitorear los resultados de sus variables biológicas y ajustar los tratamientos.
5. La telemedicina ya permite practicar algunos exámenes en los consultorios periféricos y recibir el informe de los especialistas situados en los servicios hospitalarios, en tiempo real.
6. Los avances terapéuticos permitirán el manejo de numerosas enfermedades, con un gran impacto en la calidad de vida de muchas personas, tanto en la esfera de nuevos medicamentos, más poderosos y específicos, como de la cirugía mínimamente invasiva.
7. Los implantes y reemplazos de órganos artificiales, prótesis más livianas y de mayor duración, equipos de ayuda sensorial (para ciegos y sordos) y un mejor soporte psicológico permitirán rehabilitar un mayor número de personas para reintegrarlos a una vida laboral y social activa.
8. Para que los sistemas de IA puedan ser aplicados en salud, necesitan ser entrenados mediante datos que son generados en actividades clínicas como tamizaje, diagnóstico, asignación de tratamiento, entre otros, para que puedan aprender de grupos similares, asociación entre características y resultados de interés. También aquí la coordinación con la protección de los datos sensibles debe ser mejorada.
9. La IA en salud toca cinco grandes dimensiones: salud poblacional, salud individual, sistemas de salud, industria farmacéutica y tecnología médica. En relación con las enfermedades, la IA se concentra principalmente en cáncer, enfermedades del sistema nervioso y enfermedad cardiovascular, debido a que estas son las principales causas de muerte y los diagnósticos tempranos son cruciales para prevenir el deterioro del estado de salud de los pacientes.
10. La fortaleza de los sistemas de IA está en el diagnóstico temprano por medio del análisis en imagenología, genética, electrofisiología o registros médicos electrónicos, pero existen barreras a su aplicación por falta de estándares para evaluar su seguridad y eficacia y las limitaciones al intercambio de datos (falta de incentivos, poca seguridad y aspectos éticos y legales).

11. La capacidad de cómputo de la IA de grandes volúmenes de datos orientada hacia, por ejemplo, modelos matemáticos de segmentación de pacientes para seguimiento, diagnóstico, tratamiento y control, permite un tratamiento personalizado para una fracción importante de la población.
12. La IA permite la detección temprana de condiciones adicionales para pacientes crónicos, basada en sistemas de asistencia diagnóstica, tamizaje automatizado, priorización, triage, entre otros, basados en aprendizaje automático y con ello puede fortalecer la atención primaria; por ejemplo, asistir a médicos generales en la separación de casos que no requieren niveles más complejos de atención a través de sistemas diagnósticos que empaquetan el conocimiento de millones de transacciones de especialistas y sub especialistas en áreas, por ejemplo, como la radiología.
13. La IA permitirá desarrollar una estrategia de salud digital para telemedicina de consulta médica, y conformar un pilar fundamental de un modelo de atención en red y de potenciamiento de la capacidad de especialistas para una toma de decisiones eficiente desde los primeros niveles de atención y la automatización de procesos administrativos y de gestión.
14. La ingeniería biomédica es una disciplina que tiene actualmente un fuerte desarrollo, tanto desde el punto de vista académico como profesional. En EE. UU. existen 19.800 ingenieros biomédicos y la demanda por ellos está creciendo a una tasa de anual de 4%.¹⁵ En Chile, el desarrollo de la Ingeniería Biomédica ha sido más lento, a pesar de que es una especialidad que tiene una larga tradición en Europa y Estados Unidos, países en los que es ampliamente reconocida. Importantes universidades otorgan el grado de Bachiller en Ciencias de Ingeniería Biomédica y disponen de diversos programas de postgrado.
15. En Europa y USA La formación de ingenieros biomédicos se ha desarrollado en forma paralela a las necesidades de los proveedores de equipos médicos de contar con profesionales preparados para diseñar y construir estos equipos. Algunas de las áreas en las que se forman estos profesionales son: ingeniería celular, ingeniería de tejidos, biomateriales, bioelectrónica, bioimagen, biomecánica, bioingeniería molecular, mecanobiología, neurotecnología, nanodispositivos biomédicos, ciencia de datos biomédica, medicina computacional, neuroingeniería, robótica, órganos artificiales, y nanomateriales.
16. En Chile existen cuatro Universidades que cuentan actualmente con programas de formación de pregrado en Ingeniería Biomédica: Universidad de Valparaíso, Universidad de Concepción, Universidad de Santiago y Universidad Católica. Tres de ellas tienen programas de postgrado para formar Ingenieros en el área biomédica, a saber, la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile.
17. La formación del Ingeniero Civil Biomédico está orientada a que éste se desempeñe entregando soporte técnico a equipos y dispositivos médicos, ejecutando proyectos de ingeniería aplicados a la medicina y la biología, desarrollando proyectos en sistemas de información para la salud en salud y en la administración y gestión de organizaciones relacionadas con la salud.

¹⁵ <https://www.bls.gov/ooh/architecture-and-engineering/biomedical-engineers.htm>

9.3 Recomendaciones

1. Promover políticas públicas prioritarias para controlar los factores de riesgo prevalentes en la población, como el Índice de masa corporal elevado (falta de actividad física), el riesgo alimentario por una dieta no saludable, el indicador precoz de la diabetes, la hipertensión, el tabaquismo, el alcohol y otros riesgos menores como los ocupacionales, la contaminación del aire, el aumento de la concentración del colesterol de baja densidad en la sangre o la insuficiencia renal crónica.
2. De lo anterior se deriva la necesidad de
 - actualizar el modelo de atención fortaleciendo la atención primaria de salud (APS), no concebida como un primer nivel de atención, sino que como un nivel global de gestión de las patologías de las personas y de control de los factores de riesgo y prevención de las enfermedades.
 - integrar las redes asistenciales, fortalecer la atención domiciliaria y superar la crisis hospitalaria.
 - actualizar el modelo de gestión del sistema de salud de uno que controla procesos a otro que mida los resultados de salud de las personas.
3. Impulsar iniciativas para mejorar el funcionamiento del sector salud con ayuda de las Tecnologías de la Información y Comunicación en torno a 5 ejes, a saber:
 - Intercambio de información para facilitar el cuidado continuo del paciente;
 - Gobernanza de TIC en Salud;
 - Definición de las condiciones habilitantes para el desarrollo de nuevas tecnologías para la transformación de la atención en salud;
 - Definición de la información clínica y logística para la investigación y gestión;
 - Desarrollo del Capital Humano para las TICs de Salud.
4. El IICCh debe mejorar su conocimiento del campo porque, como se ha explicado, el giro de los problemas de salud desde las enfermedades transmisibles a los no transmisibles, hará cada vez más fuerte la demanda de ingeniería, en particular en todo aquello que tenga relación con medición y diagnóstico a distancia. Esto incluye la Bioinstrumentación diagnóstica, la imagenología médica, los dispositivos terapéuticos y especialmente los Sensores biomédicos físicos, químicos, eléctricos y ópticos, que son un campo de desarrollo para la Ingeniería Biomédica tanto en la mantención de equipos como en el diseño de nuevos sistemas.
5. Promover esta oportunidad para la ingeniería chilena, debido a que las posibilidades de mejora en la salud son variadas. Un factor importante a considerar es justamente cómo leer de buena manera las particularidades locales para tender puentes con la tecnología existente o en aplicación en países mejor preparados. Se deben considerar además las condiciones habilitantes, como los niveles de digitalización de los registros e imagenología, interoperabilidad de sistemas, conectividad, regulación, entre otros, con la precaución de no olvidar el importante factor de la gestión del cambio, más allá de la simple digitalización de procesos existentes.

ANEXOS

Referencias

- Donskoi, D. Dmitri y Vladimir M. Zatsiorski (1988): *Biomecánica de los ejercicios físicos*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- Concha, F., Sarabia-Vallejos, M., Hurtado, D.E., 2018. Micromechanical model of lung parenchyma hyperelasticity. *J. Mech. Phys. Solids* 112, 126–144. doi:10.1016/j.jmps.2017.11.021
- Dux-Santoy, L., Guala, A., Sotelo, J., Uribe, S., Teixidó-Turà, G., Ruiz-Muñoz, A., Hurtado, D.E., Valente, F., Galian-Gay, L., Gutiérrez, L., González-Alujas, T., Johnson, K.M., Wieben, O., Ferreira, I., Evangelista, A., Rodríguez-Palomares, J.F., 2019. Low and Oscillatory Wall Shear Stress Is Not Related to Aortic Dilatation in Patients With Bicuspid Aortic Valve. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* doi:10.1161/ATVBAHA.119.313636
- Gámez, B., Flores, C., Cabrera, F., Cabrera, J., 2016. Design of a biomechanics prosthesis for child. *Rev. Ing. UC* 23, 58–66.
- Garzón-Alvarado, D., Duque, C., Ramirez, A., 2009. Sobre la aparición de la biomecánica y la mecanobiología computacional: experimentos computacionales y recientes hallazgos. *Rev. Cuba. Investig. Biomédicas* 28.
- Huiskes, R., 1995. The law of adaptive bone remodeling: a case for crying Newton?, in: Odgaard, A., Weinans, H. (Eds.), *Bone Structure and Remodeling. Recent Advances in Human Biology*. World Scientific, Singapore, pp. 15–23.
- Hurtado, D.E., Castro, S., Madrid, P., 2017. Uncertainty quantification of 2 models of cardiac electromechanics. *Int. j. numer. method. biomed. eng.* 33, e2894. doi:10.1002/cnm.2894
- Hurtado, D.E., Rojas, G., 2018. Non-conforming finite-element formulation for cardiac electrophysiology: an effective approach to reduce the computation time of heart simulations without compromising accuracy. *Comput. Mech.* 61, 485–497. doi:10.1007/s00466-017-1473-5
- Meléndez-Gallardo, J., Eblen-Zajjur, A., 2018. Thermo-dependence of noxious mechanical heterotopic stimulation-dependent modulation of the spinal dorsal horn response to somatosensory stimulation. *J. Integr. Neurosci.* 17, 413–424. doi:10.3233/JIN-180076
- Meléndez-Gallardo, J., Eblen-Zajjur, A., 2016. Noxious mechanical heterotopic stimulation induces inhibition of the spinal dorsal horn neuronal network: analysis of spinal somatosensory-evoked potentials. *Neurol. Sci.* 37, 1491–1497. doi:10.1007/s10072-016-2613-y
- Prendergast, P., 1997. Finite element models in tissue mechanics and orthopaedic implant design. *Clin. Biomech.* 12, 343–366. doi:10.1016/S0268-0033(97)00018-1
- Van der Meulen, M.C.H., Huiskes, R., 2002. Why mechanobiology? *J. Biomech.* 35, 401–414. doi:10.1016/S0021-9290(01)00184-1

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

EMPRESAS SOCIAS

AGUAS ANDINAS S.A.
AGUAS NUEVAS S.A.
ALSTOM CHILE S.A.
ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.
ANTOFAGASTA MINERALS S.A.
ARCADIS CHILE S.A.
ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO
BESALCO S.A.
CIA. DE PETROLEOS DE CHILE COPEC S.A.
COLBÚN S.A.
CyD INGENIERÍA LTDA.
EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.
EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN LTDA.
EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.
EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.
EMPRESAS CMPC S.A.
ENAEX S.A.
ENEL GENERACIÓN CHILE S.A.
FLUOR CHILE S.A.
INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.
MINERA ESCONDIDA LTDA.
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.
SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.
IEC INGENIERÍA S.A.
JRI INGENIERÍA S.A.
LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
SYNEX INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.